

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Ozonização de grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.): processos de saturação e de decomposição, inativação de *Fusarium graminearum* e efeito na qualidade dos grãos

Francisco Raylan Sousa Barbosa
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

FRANCISCO RAYLAN SOUSA BARBOSA

Ozonização de grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.): processos de saturação e de decomposição, inativação de *Fusarium graminearum* e efeito na qualidade dos grãos

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

Orientador: Ernandes R. de Alencar

Coorientadores: Leda R. D. Faroni
Marcus V. de A. Silva
Franklin J. Machado

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2024**

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

T

B238o
2024

Barbosa, Francisco Raylan Sousa, 2025-
Ozonização de grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.) :
processos de saturação e de decomposição, inativação de
Fusarium graminearum e efeito na qualidade dos grãos /
Francisco Raylan Sousa Barbosa. – Viçosa, MG, 2024.
1 dissertação eletrônica (55 f.): il.

Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Agrícola, 2024.
Referências bibliográficas: f. 46-55.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.068>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Cevada - Doenças e pragas - Controle. 2. Fungos
fitopatogênicos - Controle. 3. Germinação. 4. Ozônio. 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. 633.1694677

FRANCISCO RAYLAN SOUSA BARBOSA

Ozonização de grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.): processos de saturação e de decomposição, inativação de *Fusarium graminearum* e efeito na qualidade dos grãos

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

APROVADA: 30 de agosto de 2024.

Assentimento:

Francisco Raylan Sousa Barbosa
Autor

Ernandes Rodrigues de Alencar
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 27/02/2025 às 15:53:02 e pelo orientador em 27/02/2025 às 16:01:16. 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 **XOPZ.TRQF.NLSX** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais e irmãos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e força que me concedeu para concluir esse trabalho.

A minha mãe pelo amor, carinho e cuidado que teve comigo e por sempre me ouvir nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Ao meu orientador Ernandes Rodrigues pela confiança e os ensinamentos.

Aos meus amigos que durante essa jornada fizeram a caminhada mais leve, com seus conselhos, conversas e risadas em especial Andressa Graebin, Vanessa Reniele; Patrícia Brito; Diana Jhulia; Francisca Adaíla e Liline Marques.

Aos meus colegas e amigos de laboratório Eugênio Siteo, Carollayne Magalhães e Allyfe Henrique pela dedicação que tiveram em me ajudar em diversas etapas do experimento, seus ensinamentos foram cruciais para o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu companheiro Mateus Oliveira Silva que esteve comigo a todo momento, quero dedicar a você todo esse trabalho que por inúmeras vezes madrugou comigo no laboratório, que por inúmeras vezes foi levar café da manhã e almoço para mim. Muito obrigado por sua dedicação a mim, te amo muito.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A força do amor prevalece na dor”.
(Francisco Raylan)

RESUMO

BARBOSA, Francisco Raylan Sousa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2024. **Ozonização de grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.): processos de saturação e de decomposição, inativação de *Fusarium graminearum* e efeito na qualidade dos grãos.** Orientador: Ernandes Rodrigues de Alencar. Coorientadores: Leda Rita Dantonino Faroni, Marcus Vinicius de Assis Silva e Franklin Jackson Machado.

Os grãos da cevada (*Hordeum vulgare* L.) podem ser contaminados por micotoxinas ainda no campo ou durante o processo de malteação. Então, é importante que sejam adotadas técnicas de controle dos fungos, de tal forma a reduzir o risco de contaminação durante a produção do malte. Desta forma os objetivos do presente estudo foram (i) Caracterizar a cinética de decomposição do ozônio em meio poroso de cevada em duas vazões específicas ($1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$); (ii) Determinar a capacidade do ozônio de inativar *Fusarium graminearum* em cevada e possíveis alterações qualitativas no produto, em diferentes combinações vazão específica e tempo de exposição (0 (controle), 8, 16 e 24 h). Na ozonização dos grãos, foi adotada a concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ e vazões específicas de ar de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Para a vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, o tempo saturação e a concentração da saturação foram de $337,8 \text{ min}$ e $0,39 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. O tempo saturação e a concentração da saturação referente à vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ foram de $105,6 \text{ min}$ e $0,49 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o de primeira ordem, utilizado para obter a meia-vida do ozônio no meio poroso. As meias-vidas do ozônio para as vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ foram iguais a $4,0$ e $5,3 \text{ min}$, respectivamente. No que se refere à germinação, para a vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, verificou-se redução da germinação, quando se adotaram os tempos de exposição de 16 e 24 h, em comparação as amostras não ozonizadas (0 h). A ozonização alterou a cor dos grãos de cevada. A saturação de cor dos grãos aumentou à medida que se elevou o tempo de exposição ao ozônio, quando se adotou a vazão específica equivalente a $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, assim como na diferença de cor, com e nos tempos de exposição de 16 e 24 h. Quando se adotaram as combinações $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24 \text{ h}$ ($34,4 \pm 7,8\%$) e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$ ($41,9 \pm 2,3$) o ozônio foi eficaz na inativação do fungo. Conclui-se que: i) o processo de saturação de meio poroso com cevada é influenciado pela vazão específica do ar; ii) modelo cinético de primeira ordem é o mais adequado para descrever a decomposição do ozônio em meio poroso de cevada; iii) tratamento de cevada com ozônio, na vazão específica do ar de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ e concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, por até 24 h,

não acarreta em alterações indesejáveis na qualidade dos grãos; iv) é possível o controle eficaz de fungos em grãos cevada, especialmente *F. graminearum*, adotando-se as seguintes combinações de vazão específica do ar e tempo de exposição ao ozônio: 1,0 m³ min⁻¹ t^{1/24} e 2,0 m³ min⁻¹ t^{1/8} h.

Palavras-chave: Ozonização; *Hordeum vulgare* L.; Germinação; Controle de fungos

ABSTRACT

BARBOSA, Francisco Raylan Sousa, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2024. **Ozonation of barley grains (*Hordeum vulgare* L.): saturation and decomposition processes, inactivation of *Fusarium graminearum* and effect on grain quality.** Adviser: Ernandes Rodrigues de Alencar. Co-advisers: Leda Rita Dantonino Faroni, Marcus Vinicius de Assis Silva and Franklin Jackson Machado.

Barley grains (*Hordeum vulgare* L.) can be contaminated by mycotoxins in the field or during the malting process. Therefore, it is important to adopt fungal control techniques in order to reduce the risk of contamination during malt production. Thus, the objectives of this study were (i) to characterize the kinetics of ozone decomposition in porous barley media at two specific flow rates ($1.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ and $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$); (ii) to determine the capacity of ozone to inactivate *Fusarium graminearum* in barley and possible qualitative changes in the product, at different combinations of specific flow rate and exposure time (0 (control), 8, 16 and 24 h). In the ozonation of the grains, an input concentration of 1.0 mg L^{-1} and specific air flow rates of 1.0 and $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, at $20 \text{ }^\circ\text{C}$, were adopted. For the specific flow rate of $1.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, the saturation time and saturation concentration were 337.8 min and 0.39 mg L^{-1} , respectively. The saturation time and saturation concentration for the specific flow rate of $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ were 105.6 min and 0.49 mg L^{-1} , respectively. The model that best fitted the data was the first-order model, used to obtain the ozone half-life in the porous medium. The ozone half-lives for the specific flow rates of 1.0 and $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ were equal to 4.0 and 5.3 min, respectively. Regarding germination, for the specific flow rate of $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, a reduction in germination was observed when the exposure times of 16 and 24 h were adopted, compared to the non-ozonated samples (0 h). Ozonation changed the color of the barley grains. The color saturation of the grains increased as the exposure time to ozone increased, when the specific flow rate equivalent to $1.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ was adopted, as well as in the color difference, with and at the exposure times of 16 and 24 h. When the combinations $1.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24 \text{ h}$ ($34.4 \pm 7.8\%$) and $2.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$ (41.9 ± 2.3) were adopted, ozone was effective in inactivating the fungus. It is concluded that: i) the saturation process of porous medium with barley is influenced by the specific air flow rate; ii) a first-order kinetic model is the most appropriate to describe the decomposition of ozone in porous barley medium; iii) treatment of barley with ozone, at a specific air flow rate of $1.0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ and an input concentration of 1.0 mg L^{-1} , for up to 24 h, does not result in undesirable changes in grain quality; iv) effective control of fungi in barley grains,

especially *F. graminearum*, is possible by adopting the following combinations of specific air flow rate and ozone exposure time: 1.0 m³ min⁻¹ t⁻¹/24 and 2.0 m³ min⁻¹ t⁻¹/8 h

Keywords: Ozonation; *Hordeum vulgare* L.; Germination; Fungal control

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1:** Curvas de regressão de concentração residual do ozônio em função do tempo de exposição em grãos de cevada, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ (C_0) e vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ 31
- Figura 2:** Análise de componentes principais grãos de cevada expostos ou não ao ozônio na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 horas. A) PCA dos tratamentos; B) PCA das variáveis. 39
- Figura 3:** Infecção por fungos (%) em em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, em diferentes combinações de vazões específicas e tempo de exposição. 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos cinéticos de reação	25
Tabela 2: Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação (R^2) de concentração residual do ozônio em função do tempo de exposição em grãos de cevada, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ (C_0) e vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$	30
Tabela 3: Equações de regressão referentes aos modelos cinéticos de decomposição ajustadas aos dados de concentração residual do ozônio em função do tempo, em grãos de cevada, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ (C_0) e vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$	32
Tabela 4: Valores médios referentes aos testes de germinação (%), de capacidade germinativa (%), de sensibilidade à água (%), de teor de água (%), de absorção de água (%) e de condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{ g}^{-1}$) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h	33
Tabela 5: Valores médios referentes à luminosidade (L^*), tonalidade de cor (h^*), saturação de cor (C^*) e diferença de cor (ΔE^*) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por, por até 24 h	35
Tabela 6: Valores médios referentes às massas frescas da parte aérea (MFPA - g) e da raiz (MFR - g) e às massas secas da parte aérea (MSPA - g) e da raiz (MSR - g) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h	37
Tabela 7: Equações dos componentes 1 (PC1) e 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA) para grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
CG	Capacidade Germinativa
EG	Energia Germinativa
ZEN	Zearalenona
AF	Ácido fusárico
ENN	Enniatinas
BEA	Beauvericinas
DNA	Ácido desoxirribonucleico
O ₃	Ozônio
UFV	Universidade Federal de Viçosa
IOA	Associação Internacional de Ozônio
EROs	Espécies reativas de oxigênio
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
WU	Absorção de água
SW	Sensibilidade à água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Cultura da cevada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	16
2.2 Aplicações da Cevada	17
2.3 Fungo do gênero <i>Fusarium</i> e micotoxinas	18
2.3.1 Fumonisinias	19
2.3.2 Fusarinas	19
2.3.3 Zearalenona	20
2.3.4 Ácido fusárico	20
2.4 Ozônio (O ₃) e suas aplicações	21
2.4.1 Mecanismos de ação antimicrobiana do ozônio	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Obtenção e quantificação do gás ozônio	23
3.2 Ozonização dos grãos	23
3.3 Processo de Saturação	24
3.4 Cinética de decomposição	24
3.5.1 Teste de germinação, tetrazólio e sensibilidade à água	25
3.5.2. Teor de água, absorção de água, condutividade elétrica e análise de cor	26
3.5.3 Determinações de matéria fresca e matéria seca	27
3.6 Determinação da eficácia do ozônio no controle de <i>Fusarium graminearum</i>	28
3.7 Análise estatística	29
4. RESULTADOS	29
5. DISCUSSÃO	42
6. CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS	46

1. INTRODUÇÃO

A cevada (*Hordeum vulgare* L.) é o quarto cereal no que se refere à produção de grãos em escala mundial, ficando atrás apenas do trigo, milho e arroz. Essa cultura apresenta uma produção de 155 milhões de toneladas por ano em todo o mundo, colocando-a como um dos cereais de maior importância no cenário global, devido seu uso na alimentação animal e principalmente na produção de malte e fabricação de cerveja (Hofer et al., 2016; FAO, 2022).

O consumo do grão da cevada pela indústria vem apresentando um crescimento exponencial principalmente em decorrência da sua importância econômica para produção de malte. A industrial mundial de malte apresenta uma capacidade de produção anual estimada em 22 milhões de toneladas, na qual 90% da produção é feita com cevada, e a maior parte dessa produção é absorvida pela indústria cervejeira (Oliveira et al., 2012).

No decorrer do processo de fabricação da cerveja, o grão de cevada passa por alguns processos, que compreende a maltagem e a fabricação da cerveja. Durante o processo de maltagem a cevada passa por algumas etapas de preparação que consiste na maceração, germinação e secagem. Na etapa de maceração a cevada é embebida em água aerada, seguida de repouso de ar, nesse processo o grão absorve água até ficar com um teor de umidade entre 42 a 47% e submetido a uma temperatura que varia de 12 a 25 °C para induzir a germinação sob uma atmosfera de alta umidade relativa, para a obtenção do malte (Pascari et al., 2019; Kunze, 2004; Wolf-Hall, 2007; Schwarz, 2017).

A infecção das plantas por fungos, pode iniciar desde o campo até o armazenamento dos grãos. Dentre os microrganismos que mais infectam as plantas no campo os fungos do gênero *Fusarium*, que causam a giberela (FHB), que podem causar alterações sensoriais na qualidade da cerveja (Benesová, et al., 2022; Garbe; Schwarz; Ehmer, 2009; Mastanjević; Mastanjević; Krstanović, 2017).

A ocorrência desses fungos provoca inúmeros problemas à saúde devido a metabólicos secundários (micotoxinas) produzidos por esses agentes, que possuem potencial carcinogênico e mutagênico que podem ser transferidos do grão para seus subprodutos, como do malte para cerveja (Oliveira et al., 2012; Champeil et al., 2004; Lancova et al., 2008; Schwarz et al., 1995, Wolf-Hall; Schwarz, 2002). Desta forma, a contaminação por fungos na cadeia produtiva do malte e cervejeira é um

processo dinâmico que afeta negativamente diferentes aspectos da produção do malte, a qualidade e o rendimento total (Zuluaga-Calder et al., 2023).

Devido a todos esses problemas relatados com contaminação fúngica na cevada, para produção do malte é de grande importância buscar novas estratégias e tecnologias para redução desses agentes. Desta forma, o ozônio apresenta uma forte capacidade oxidante com bastante utilidade na indústria de alimento, sendo aplicado como formas gasosas ou aquosas para descontaminação de alimentos, como frutas, vegetais, especiarias, ervas, bebidas, carne e peixe (Zuluaga-Calder et al., 2023; Pandiselvam et al., 2019).

A utilização do ozônio apresenta como benefício a sua fácil decomposição em oxigênio, gerando poucos resíduos no produto final e eliminando a necessidade de remoção do gás. Além disso, o ozônio é considerado uma técnica ecologicamente correta, pois não deixa resíduos e apresenta propriedades não residuais. Por essas razões, essa técnica é vista como uma das tecnologias verdes mais promissoras para melhorar a qualidade e segurança dos alimentos, uma vez que seu uso pode preservar ou melhorar os parâmetros de qualidade dos produtos hortícolas, por inibir enzimas responsáveis pela degradação da cor para evitar a descoloração dos produtos (Sivaranjani et al., 2021; Pandiselvam et al., 2019, 2020).

Contudo, fazem-se necessários estudos para definir metodologias efetivas para uso do ozônio em grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.) visando o controle de fungos, especialmente *Fusarium graminearum*.

Desta forma os objetivos do presente estudo foram (i) Caracterizar o processo de saturação e cinética de decomposição do ozônio em meio poroso de cevada em diferentes vazões específicas; (ii) Verificar o efeito do ozônio na qualidade em grãos de cevada e diferentes combinações de vazão específica e tempo de exposição (iii) Determinar a capacidade do ozônio em inativar *Fusarium graminearum* em grãos de cevada

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura da cevada (*Hordeum vulgare* L.)

A cevada (*Hordeum vulgare* L.) é uma das culturas mais antigas domesticadas pelo ser humano, sendo amplamente utilizada na alimentação animal, na maltagem e na produção de cerveja (Verma et al., 2022). Esta espécie é taxonomicamente classificada como membro da família Poaceae, sendo considerada uma das culturas chave em regiões de clima frio e de alta altitude (Hu et al., 2024).

A cevada é vista como uma cultura de inverno, caracterizada por seu ciclo de vida curto, tolerância às baixas temperaturas, além de se desenvolver bem em solos com pH neutro ou levemente ácido e com boa drenagem. Devido a essas características a *H. vulgare* se tornou uma das culturas mais amplamente difundidas entre os agricultores (Rani; Bhardwaj, 2021; Saleem et al., 2020; Vilchez et al., 2023). No entanto, para alcançar alta produtividade, essa cultura é preferencialmente cultivada em solos férteis, com boa capacidade de retenção de água e níveis moderados de matéria orgânica (Berwian et al., 2024).

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a produção mundial de cevada na safra 2022/2023 foi estimada em 149,53 milhões de toneladas (MT), com uma área plantada de aproximadamente 48.941.020 hectares (Pronyk; Mazza, 2012). No Brasil, de acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a produção nacional foi estimada em cerca de 452.827 toneladas em 2021, concentrando-se principalmente na região sul do país devido ao clima favorável, que resulta em um produto de maior qualidade (Fagundes, 2003).

Esta cultura tem grande importância econômica em diversos setores, como na produção de ração animal, fonte de matrizes energéticas para a produção de etanol e, principalmente, na indústria de malte, cerveja e outras bebidas alcoólicas (Flavin et al., 2023; Berwian et al., 2024). Nesse contexto, a cevada apresenta uma importância considerável tanto na agricultura quanto na indústria. Mundialmente a maior parte dessa cultura é destinada à alimentação animal (55-a 60%), seguido para indústria do malte (30 a 40%), alimentação (2 a 3%) e para produção de semente (5%) (Ullrich 2010).

2.2 Aplicações da Cevada

O uso da cevada para ração animal depende de sua composição química, que pode ser influenciada pela cultivar e local de cultivo. O teor de proteína da cevada depende das práticas agrícolas adotadas durante o cultivo, condições ambientais e manejo nutricional (Arendt e Zannini 2013; Qi et al. 2006). O alto teor de amido e proteína no grão da cevada são na faixa de 50-70% de amido e 10-20% de proteína em base seca, característica que torna a cevada uma fonte de energia adequada em animais ruminantes e não ruminantes, aves e peixes (Kellems e Church 2010).

Outra utilização da cevada é como matéria-prima para produção de bioetanol (Trakselyte-Rupsiene et al., 2022; Pielech-Przybylska et al., 2017), devido ao seu alto teor de aminoácidos, que favorece a fermentação alcoólica, além de ser uma cultura amplamente cultivada (Khatibi et al., 2014).

A cevada é uma matéria-prima que origina diversos produtos, mas seu principal uso está voltado para a indústria cervejeira. A cerveja é uma das bebidas alcoólicas mais consumidas no mundo, destacando-se como a terceira bebida mais consumida globalmente, ficando atrás apenas da água e do chá, com um consumo médio mundial de aproximadamente 200 bilhões de litros por ano (Singh et al., 2023; Berwian et al., 2024).

A indústria cervejeira, para atender à alta demanda pela bebida, é uma das principais consumidoras de malte, que é a matéria-prima essencial para a fabricação da cerveja (González-García et al., 2018). O malte é obtido através de uma série de alterações físicas e químicas que ocorrem no grão, sendo este processo crucial para a produção da cerveja. Durante esse processo, os grãos são embebidos em água para germinar, etapa que ocorre em um ambiente úmido e aeróbio, a uma temperatura de 16 a 20 graus, por um período de 3 a 6 dias. Após essa fase, os grãos são secos em estufa a uma temperatura de 80 a 85 °C, interrompendo, assim, o processo germinativo. Durante essa etapa, ocorre a reação de Maillard, que escurece a cor do grão e confere o sabor característico do malte (Gu et al., 2023).

Após a maltagem, o grão passa por várias mudanças, principalmente no aumento da concentração de açúcares livres e de nitrogênio solúvel, tornando-se uma matéria-prima excelente para a fermentação. Devido o principal destino na cevada ser na produção do malte da indústria cervejeira (Conab, 2023) Existem diversos fatores podem comprometer a qualidade dos grãos de cevada, dentre os quais, destaca-se a

ocorrência de fungos prejudiciais ao processo de maltação (Osbourne; Stein, 2006), como fungos do gênero *Fusarium*.

2.3 Fungo do gênero *Fusarium* e micotoxinas

As espécies de *Fusarium* são consideradas os principais causadores de doenças em plantas (Pereira et al., 2020). Essas espécies podem ter diferentes requisitos de temperatura e umidade para seu desenvolvimento, além de variações em relação à agressividade durante o processo infeccioso. Essas especificidades podem comprometer a eficácia do manejo aplicado para controle da doença, resultando em grãos de qualidade inferior e menor retorno econômico para o produtor (Wegulo et al., 2015).

Os fungos do gênero *Fusarium* são produtores de micotoxinas e por isso são os principais patógenos em cereais como trigo, aveia, cevada e milho (Nganje et al., 2004). Ainda assim, além de cereais, eles podem causar até 50% de perda de rendimento em culturas de frutas tropicais como banana e abacaxi, lentilha, tomate e ervilha (Chittem et al., 2015; Tiwari et al., 2018). Os sintomas manifestam-se como descoloração ou escurecimento das espiguetas infectadas e, sob condições favoráveis ao desenvolvimento do patógeno, pode ocorrer a produção de sinais do patógeno que variam entre tonalidades alaranjadas e avermelhadas (Mcmullen et al., 2012).

A doença pode causar danos à produtividade e reduzir a qualidade dos grãos, tanto pela perda de água e nutrientes durante o processo infeccioso quanto pelo acúmulo de micotoxinas produzidas pelo fungo nos grãos, que podem provocar problemas de saúde em humanos e animais (Ferrigo et al., 2016).

As micotoxinas são substâncias que se caracterizam pelo baixo peso molecular e podem causar efeitos tóxicos no organismo mesmo em concentrações baixas. Portanto, qualquer exposição a fungos toxigênicos pode ser bastante perigosa. Além disso, as micotoxinas estão presentes em todos os níveis da cadeia alimentar, desde o período pré-colheita e pós-colheita até o armazenamento ou pós-processamento dos alimentos (Tadei et al., 2020).

As micotoxinas podem se acumular nos cereais e se tornarem fatais ou prejudicar gravemente os sistemas biológicos humanos e animais. Muitas toxinas como fumonisinas e tricotecenos são estáveis ao calor e não podem ser degradadas

pelo cozimento. A única maneira de superar essa situação é prevenindo ou inibindo a produção de micotoxinas no campo e no armazenamento (Perincherry; Lalak-Kańczugowska; Stępień, 2019).

Os metabólitos secundários fúngicos são substâncias como policetídeos (aflatoxinas e fumonisinas), terpenos (toxina T-2, desoxinivalenol—DON), terpenos indólicos (paxilina e lolitremes), peptídeos não ribossômicos (sirodesmina, eniatinas e beauvericinas), alcalóides (peramina) e sideróforos (ferricrocina) que frequentemente desempenham um papel no desencadeamento de sintomas de infecção em plantas (Karanyi; Miskei, 2013).

2.3.1 Fumonisinias

As fumonisinas são um grupo de micotoxinas derivadas de policetídeos, produzidas por *Fusarium verticillioides*, *Fusarium proliferatum*, *Fusarium sacchari*, *Fusarium subglutinans*, *Fusarium fujikuroi* e várias outras espécies (Stępień; Koczyk; Waśkiewicz, 2011,). Este grupo de toxinas é responsável por causar leucoencefalomalácia equina, edema pulmonar suíno e câncer de esôfago humano (Smith, 2018).

As fumonisinas também são fitotóxicas, e a fumonisina B₁ causa danos a uma ampla gama de cereais e outras culturas importantes. As sementes de cereais contaminadas com espécies produtoras de FB₁ apresentam degradação do endosperma juntamente com a ausência de matriz proteica ao redor dos grânulos de amido, possivelmente causada pela atividade de proteases alcalinas liberadas pelos fungos. A toxina rompe a membrana plasmática em espécies vegetais e animais, provavelmente causada pelo acúmulo de intermediários esfingolipídicos tóxicos. Esses intermediários rompem a biossíntese de esfingolipídios, inibem a enzima ceramida sintase e, portanto, rompem a sinalização e as funções celulares, alteram a apoptose e a replicação e são um possível carcinógeno para os seres humanos (Kamle et al., 2019).

2.3.2 Fusarinas

Fusarinas são compostos policetídeos com uma 2-pirrolidona substituída em um cromóforo poliênico. Eles são comumente produzidos por *Fusarium avenaceum*,

F. culmorum, *F. fujikuroi*, *F. graminearum*, *Fusarium oxysporum*, *Fusarium poae*, *Fusarium sporotrichioides*, *Fusarium venenatum* e também por *Metarhizium anisopliae* (Niehaus et al., 2014). Certos tipos de fusarinas, como fusarina A, B, C e D, foram descobertos em 1981 por Wiebe e Bjeldanes em Berkeley (Califórnia, EUA) (Wiebe; Bjeldanes, 1981). Entre os diferentes tipos, a fusarina C foi isolada e parcialmente caracterizada, também foi identificada como um mutagênico que pode reverter cepas auxotróficas de *Salmonella* para prototróficas no teste Ames *Salmonella typhimurium* (Cheng et al., 1985).

2.3.3 Zearalenona

A zearalenona (ZEN), anteriormente conhecida como toxina F-2, é comumente encontrada em cereais como cevada, sorgo, aveia, trigo, milho e arroz. Devido à sua atividade estrogênica, causa vulvovaginite em suínos. Na beterraba vermelha e no milho, a ZEN estimula o vazamento de eletrólitos (como β -cianina e aminoácidos), bloqueia a extrusão de H^+ causando acidificação e, portanto, reduz o comprimento do sistema radicular (Perincherry; Lalak-Kańczugowska; Stępień, 2019). A toxina também reduz a atividade da enzima ATPase em coleótilos de milho. Os resultados de Vianello e Macri (1978) sugeriram que a ZEN poderia alterar a permeabilidade do plasmalema e do tonoplasto.

2.3.4 Ácido fusárico

Além das fusarinas, o ácido fusárico (AF) é bem conhecido por sua fitotoxicidade e é uma das primeiras fitotoxinas relatadas em sintomas de murcha de tomateiro causada por *F. oxysporum* f. sp. *lycopersici*. Embora a toxina não desempenhe nenhum papel no estágio inicial da infecção, ela contribui significativamente para o processo de patogênese durante os estágios seguintes (Selim; El-Gammal, 2015). Recentemente, a atividade quelante de íons do AF foi relatada em tomate infectado (López-Díaz et al., 2018). A forte fitotoxicidade exibida pelo AF é reduzida pelo fornecimento exógeno de cobre, ferro e zinco. Além disso, a toxina pode aumentar o nível de espécies reativas de oxigênio (ROS), reduzir a atividade de enzimas antioxidantes como catalase e ascorbato peroxidase e induzir morte celular em folhas de tomate destacadas (Singh; Upadhyay, 2014).

2.4 Ozônio (O₃) e suas aplicações

A contaminação da cevada tem incentivado a pesquisa de diversos métodos para eliminar ou reduzir as concentrações de fungos micotoxigênicos e aflatoxinas. As estratégias convencionais de redução de micotoxinas envolvem mecanismos de prevenção e descontaminação, representando um desafio constante para a indústria alimentícia. Neste contexto, novos métodos de processamento têm sido constantemente explorados para alcançar a degradação completa das aflatoxinas em produtos alimentares (Pankaj et al., 2018).

Dentre os novos métodos, o uso do ozônio (O₃) tem sido considerado uma das ferramentas mais promissoras para assegurar a segurança dos alimentos (Freitas-Silva; Venâncio, 2010). Essa tecnologia tem-se destacado por sua compatibilidade ecológica e seu elevado potencial na redução da carga microbiana e no controle de aflatoxinas, demonstrando ser uma solução eficiente na redução de *F. graminearum* na cevada, sem afetar negativamente a capacidade de germinação em outras características (Zuluaga-Calder et al., 2023). O ozônio (O₃) é uma forma triatômica de oxigênio e um poderoso agente oxidante. Ele é gerado ao submeter o oxigênio a altas voltagens ou radiação ultravioleta e é utilizado para diversas finalidades, incluindo desinfecção, descoloração, inativação de vírus, degradação de micotoxinas e muitos outros (Chen et al., 2020).

Quando o oxigênio é submetido a alta voltagem, forma-se radicais de oxigênio que geram ozônio em um ambiente gasoso seco. Esses radicais se unem ao oxigênio para formar ozônio (O₃). Esse processo é crucial em aplicações industriais e ambientais, como a purificação do ar e a esterilização de superfícies. Além disso, o ozônio é uma molécula importante na proteção da Terra contra a radiação ultravioleta (Aidoo et al., 2023). O ozônio é um oxidante forte que tem várias aplicações nas indústrias alimentícias.

O ozônio tem sido estudado na descontaminação de alimentos, tais como frutas, cereais, especiarias, ervas, bebidas, produtos cárneos e peixes, dentre outro, sendo aplicado de inúmeras maneiras. Todavia, as formas de aplicação mais comuns são gasosas e aquosas (Pandiselvam, Manikantan, et al., 2019). Estudos apontam que o tratamento dos alimentos pelo gás ozônio apresentam uma redução na carga microbiana e aumentam a vida útil dos alimentos. Além disso, o ozônio também é aplicado para o controle de pragas em grãos armazenados e para degradação de

micotoxinas (Afsah-Hejri, Hajeb, & Ehsani, 2020; Pandiselvam & Thirupathi, 2015; Isikber & Athanassiou, 2015). Uma das vantagens do ozônio é que esse gás não gera resíduos, uma vez que se decompõem em oxigênio, desta forma eliminando a necessidade de remover o gás do produto. Devido a essa característica de não gerar resíduos após a aplicação, essa técnica é considerada uma prática ecológica, sendo considerado uma tecnologia verde promissora para garantir a segurança alimentar e qualidades dos produtos alimentícios (Pandiselvam et al. 2019a, 2020b). Além disso o O_3 foi listado como "Geralmente Reconhecido como Seguro" (GRAS) para desinfecção de matriz alimentar (Obadi et al., 2018).

2.4.1 Mecanismos de ação antimicrobiana do ozônio

O ozônio atua tanto de maneira direta quanto indireta na inativação dos microrganismos. A ação direta ocorre através da inativação eletrofílica, onde a molécula de ozônio reage com ligações insaturadas devido à sua alta afinidade pela estrutura dipolar, resultando na quebra dessas ligações. Essa reação promove a destruição de componentes celulares essenciais, interferindo nos processos vitais dos microrganismos. Além disso, o ozônio pode gerar radicais livres que também contribuem para a inativação indireta dos patógenos (Malik et al., 2020; Epelle et al., 2023).

A ação indireta ocorre por meio da decomposição do O_3 , que reage com componentes presentes na água ou no ar, formando espécies reativas de oxigênio (EROs), como moléculas de OH , HO_2 , O_2^- , O_3^- , HO_3^- , H_2O_2 e O^- . O conjunto de espécies reativas geradas depende do meio de aplicação. Entre as principais espécies formadas está o radical hidroxila (OH), que possui um potencial redox de 2,80 V, sendo um oxidante mais potente que o ozônio, com potencial redox de 2,07 V. A eficácia desses radicais no processo de oxidação varia conforme as condições ambientais, influenciando diretamente a eficiência da reação. Além disso, a presença de outras substâncias no meio pode potencializar ou inibir a formação dessas espécies reativas (Epelle et al., 2023).

O radical hidroxila é uma molécula extremamente instável que reage prontamente com outras moléculas para adquirir elétrons. Essa reatividade faz com que esta espécie provoque a ruptura da membrana celular dos microrganismos, resultando em sua inativação (Epelle et al., 2023; Ribeiro et al., 2020; Chapleski et al.,

2016; Bataklijev et al., 2014; Staehelin et al., 1985). A elevada reatividade do radical hidroxila é responsável por sua eficácia na desativação de diversos patógenos. Além disso, seu papel na oxidação de contaminantes ambientais destaca sua importância em processos de purificação e descontaminação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Setor de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa – UFV, em Viçosa – MG. Para realização do estudo foi adquirido um lote de grãos de cevada (*Hordeum vulgare* L.), com teor de água de 13,6% (em base úmida), da Cooperativa localizada na região Sul do Brasil.

3.1 Obtenção e quantificação do gás ozônio

O ozônio foi obtido por meio de um gerador de ozônio modelo O&L3 ORM (Ozone & Life, São José dos Campos, São Paulo, Brasil), baseado em descarga de barreira dielétrica. Para alimentar o gerador, utilizou-se oxigênio proveniente de um concentrador de oxigênio modelo EverFlo (Philips Respironics, Murrysville, Pensilvânia, EUA). As vazões volumétricas adotadas foram de 2,0 e 4,0 L min⁻¹ e uma concentração de entrada do ozônio de 1,0 mg L⁻¹, a 20 °C. A medição da vazão volumétrica foi realizada utilizando-se medidor de vazão modelo MF5700® (Siargo Ltd, Chengdu, Sichuan, China). A quantificação da concentração do gás ozônio foi obtida pelo método iodométrico por meio de titulação indireta (Eaton et al., 2000), método aceito pela Associação Internacional de Ozônio (IOA).

3.2 Ozonização dos grãos

O ozônio gerado foi injetado em um protótipo de PVC de 0,5 m de comprimento e 0,15 m de diâmetro, contendo grãos de cevada. A base do protótipo possuía uma chapa metálica perfurada, responsável pela sustentação da massa dos grãos e distribuição do gás ozônio. Em cada teste, foi utilizada uma amostra de 2,0 kg de cevada, submetida às vazões específicas do ar de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, para as vazões volumétricas de 2,0 e 4,0 L min⁻¹, respectivamente. Os tempos de exposição

ao ozônio foram 0h, 8h, 16h e 24h, na concentração de entrada do ozônio de 1,0 mg L⁻¹.

3.3 Processo de Saturação

O processo de saturação foi determinado medindo-se a concentração residual do ozônio na saída do protótipo em intervalos regulares. Para vazão específica de 1,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, foram adotados intervalos de 15 min e para 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹ intervalos de 5 min. A quantificação da concentração residual do ozônio foi realizada em triplicata, até que fossem obtidos três valores iguais. Para saturação foi adotado a concentração de entrada do ozônio de 1,0 mg L⁻¹, para as vazões específicas do ar de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹.

Para quantificação do ozônio residual, o gás era borbulhado em 50 mL da solução de iodeto de potássio (KI 2%) por um tempo de 30 segundos, utilizando-se erlenmeyer de 125,0 mL. Posteriormente, acrescentava-se 2,5 mL de ácido sulfúrico (H₂SO₄). Em seguida era realizado a titulação com tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃), com solução de amido a 1% (C₆H₁₀O₅) como indicador. Ajustou-se a Equação 1 aos dados de concentração residual. Utilizou-se a Equação 2 para a obtenção do tempo de saturação. Conhecendo-se o tempo de saturação, foi possível obter a concentração de saturação, para cada vazão específica adotada.

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

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

Em que:

C: Concentração do gás ozônio (mg L⁻¹); t: Tempo (min); a,b,c: Constantes da equação.

3.4 Cinética de decomposição

A cinética de decomposição foi determinada após a saturação da massa de grãos com ozônio, conforme Santos et al., (2007) e Souza et al., (2018). Foram adotados intervalos de tempo, durante os quais o processo de ozonização era

interrompido, de tal forma que ocorria a decomposição do ozônio no meio poroso (espaços entre grãos). Decorridos os diferentes intervalos de tempo, efetuava-se a quantificação do ozônio residual. Ajustaram-se os modelos cinéticos de ordem zero, primeira ordem e segunda ordem, na determinação da cinética de decomposição do ozônio no meio poroso formado por grãos de cevada (Tabela 1). Para o processo de decomposição foi adotado a concentração de entrada do ozônio de 1,0 mg L⁻¹, para as vazões específicas do ar de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹.

Tabela 1: Modelos cinéticos de reação

Ordem	Equação diferencial	Equação integralizada e linearizada	Meia-vida (min)
0	$\frac{dC}{dt} = -k$	$C = C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{C_0}{2k}$
1	$\frac{dC}{dt} = -kC$	$\ln C = \ln C_0 - kt$	$t_{1/2} = \frac{\ln(2)}{k}$
2	$\frac{dC}{dt} = -kC^2$	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_0} + kt$	$t_{1/2} = \frac{1}{kC_0}$

C - Concentração de ozônio (μgL^{-1}); k - Constante de decomposição (s^{-1}); t - tempo (s); C_0 - Concentração inicial do ozônio (μgL^{-1}).

Fonte: Wright (2004).

Por meio do modelo que forneceu melhor ajuste, considerando-se o coeficiente de determinação (R^2), a constante de decomposição (k) foi utilizada para o cálculo do tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) do gás ozônio no meio poroso.

3.5 Análises de qualidade dos grãos de cevada

3.5.1 Teste de germinação, tetrazólio e sensibilidade à água

O teste de germinação foi realizado de acordo com as Regras para Análise de Sementes - RAS (Brasil, 2009), 50 grãos de cevada eram distribuídos em folhas de papel germitest previamente umedecidos, formando rolos, os quais eram colocados em germinador a 25 °C. As avaliações foram realizadas ao quarto e sétimo dia. Ao final do teste, determinou-se a percentagem de plântulas normais.

O teste de tetrazólio foi realizada de acordo com a metodologia descrita pela RAS (Brasil, 2009), utilizando-se amostras de 100 grãos. Os grãos foram acondicionados por 18 horas em papel umedecido a uma temperatura de 25 °C.

Posteriormente, os grãos foram submetidos a um corte longitudinal para bisseccionar o embrião. Após a bissecção, o material foi colocado em um tubo de ensaio contendo uma solução de cloreto de trifenil tetrazólio a 1% (p / v) permanecendo em banho maria por 30 minutos a 40 °C. Após esse período os grãos foram lavados em água corrente e avaliados. Os grãos foram classificados como viáveis quando apresentavam a coloração avermelhada, sem danos ou com lesões superficiais na região não crítica dos cotilédones. Os germes não viáveis apresentavam coloração branca, rosa intenso ou com aspecto de mosaico na região de ligação dos cotilédones. Os resultados foram expressos em percentagem de grãos viáveis.

Inicialmente foi determinada a energia germinativa (EG), que expressa a porcentagem de grãos que se espera que germinem completamente nas condições normais de maltagem (European Brewing Convention, 1997). Como uma proporção dos grãos podem estar adormecidos, é possível que a germinação não ocorra completamente mesmo que os grãos estejam viáveis de acordo com o teste de capacidade germinativa. Para isso a análise de energia germinativa foi determinada usando a EG 4 mL e EG 8 mL, seguindo a metodologia European Brewing Convention, (1997). Para isso, amostras de 100 grãos foram colocadas em placa de Petri de 90 mm que continham duas camadas de papel filtro no fundo, em seguida foi acrescentado 4 mL e 8 mL de água destilada, para avaliar a energia germinativa de 4 mL e 8 mL. Posteriormente as sementes foram incubadas em uma B.O.D a uma temperatura de 20 °C. Em seguida, os grãos foram contados e removidos no tempo de 24h, 48h e 72h. As contagens acumuladas em 72h foram tomadas como porcentagem.

A sensibilidade à água (SA) dos grãos foi determinada calculando a diferença entre os resultados do EG 4 mL e o EG 8 mL (European Brewing Convention, 1997). A sensibilidade à água expressa a diminuição da energia germinativa quando há um maior volume de água é necessário para a germinação (Kunze, 2004).

3.5.2. Teor de água, absorção de água, condutividade elétrica e análise de cor

O teor de água foi determinado de acordo com o método padrão descrito pela ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2013), em estufa com circulação forçada a 130 °C, por 20h. Os resultados foram expressos em base úmida (%).

A absorção de água (AA) foi determinada utilizando-se amostras de 2,000g de cevada, pesados e contados. Posteriormente as amostras foram hidratadas com 20 mL de água destilada e incubadas em B.O.D a 25 °C, por 4h. Após esse período, os grãos foram secos em papel toalha e pesados novamente (Los et al., 2018). Os valores obtidos da absorção de água foram expressos em mg/sementes.

Para a análise da condutividade elétrica (CE), foram utilizadas amostras de 50 grãos. As amostras foram pesadas e posteriormente acondicionadas em copos de poliestireno contendo 75 mL de água destilada. Em seguida foram colocadas em uma estufa B.O.D por um período de 24h a 25 °C (Vieira et al., 2001). Após este período, foi realizada a análise da condutividade elétrica da solução, com auxílio de um condutímetro modelo MCA-15 (Tecnoyon, Piracicaba, São Paulo, Brasil). Os valores obtidos foram expressos em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$.

A avaliação da cor dos grãos de cevada foi realizada por leitura direta das coordenadas L^* ; a^* e b^* , que medem a intensidade de branco a preto (L^*), intensidade de vermelho a verde (a^*), e intensidade de amarelo a azul (b^*). As leituras foram realizadas utilizando um colorímetro modelo CR410 (Konica Minolta, Osaka, Japão), para obtenção das coordenadas. Os valores das coordenadas L^* , a^* e b^* foram utilizadas para determinar a tonalidade de cor (h^* , Equação 3), a saturação de cor (C^* , Equação 4) e a diferença total de cor (ΔE^* , Equação 5). Para calcular diferença total de cor, foi utilizada as coordenadas L^* , a^* e b^* de amostras não tratadas com ozônio.

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

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

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

Em que L_0^* , a_0^* e b_0^* são as coordenadas obtidas antes da exposição dos grãos ao ozônio e ao oxigênio.

3.5.3 Determinações de matéria fresca e matéria seca

Ao final dos 7 dias da germinação, foram realizadas as análises de massa fresca e de massa seca parte aérea e raízes. O material vegetal foi dividido em sacos de papel previamente identificados e pesados por meio de balança analítica com precisão de 0,01 g para obtenção da massa fresca. Para a obtenção da matéria seca, o material foi levado para estufa a 65 °C, por 72 horas e depois pesados novamente.

3.6 Determinação da eficácia do ozônio no controle de *Fusarium graminearum*

A eficácia do ozônio no controle de *F. graminearum* foi determinada considerando-se somente as combinações de vazão específica e tempo de exposição que não afetaram a qualidade dos grãos. Isolado de *F. graminearum* foi adquirida do Laboratório de fitopatologia da Universidade Federal de Viçosa - MG. Para o preparo do inóculo, foi utilizado o isolado de *F. graminearum* crescido em placas de Petri contendo meio de cultura BDA à temperatura de 25±2°C. Efetuou-se incubação por um período de sete dias para a formação de micélio e esporulação. As suspensões de esporos foram obtidas acrescentando 10 mL de água destilada nas placas de Petri que continham os fungos. Posteriormente obteve-se a suspensão de conídios com auxílio de bastão de vidro. Em seguida a suspensão dos conídios foi filtrada e realizada a leitura da concentração dos esporos, em microscópio óptico e um hemocítmetro (câmara de Neubauer). A suspensão de conídios foi ajustada para 1x10⁵ conídios mL⁻¹.

Na inoculação dos grãos de cevada, foi utilizado amostra de 1,0 kg de cevada. Os grãos foram imersos na suspensão de conídios por um período de 5 minutos. Posteriormente, os grãos permaneceram em câmara com fluxo de ar contínuo para promover a secagem e evitar a germinação. Em seguida, os grãos foram armazenados em estufa a 25 °C por 24h, para garantir a infecção pelos conídios.

Para o tratamento das amostras inoculadas, utilizaram-se 20 g de grãos dispostos em recipientes de PVC com aberturas no topo, na base e nas laterais cobertas com tecidos de organza. Essas amostras inoculadas e individualizadas foram dispostas no protótipo de PVC contendo 2,0 kg de grãos não inoculados, conforme descrito no item 3.2. Depois do tratamento foi realizado o plaqueamento direto dos grãos. Inicialmente, os grãos de cevada foram submetidos a desinfecção superficial com hipoclorito de sódio 0,4%, por 2,0 min (Pitt; Hocking, 2009). Em seguida, foram

adicionados 15 grãos por placa de Petri contendo meio de cultura BDA (Batata Dextrose Agar). As placas foram incubadas por 7 dias a uma temperatura de 25 °C. Os resultados foram expressos em porcentagem. Todas as análises foram realizadas em triplicatas.

3.7 Análise estatística

Foi adotado o Delineamento Inteiramente Casualizado. Na caracterização do processo de saturação, foram adotados concentração de ozônio de 1 mgL⁻¹ e duas vazões específicas de ar 1 e 2 m³ min⁻¹ t⁻¹. Os dados da concentração residual de ozônio em função do tempo foram submetidos à análise de regressão. Quanto aos dados relacionados à qualidade dos grãos de cevada, foi adotado um esquema Fatorial 2X4, sendo duas vazões específicas de ar 1 e 2 m³ min⁻¹ t⁻¹ e quatro períodos de exposição (0, 8, 16, e 24h). Inicialmente foi realizada análise de variância a 5% de probabilidade, e posteriormente, teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A escolha dos modelos cinéticos de decomposição foi baseada na significância dos coeficientes de regressão, utilizando-se o teste t ao nível de 5% de probabilidade e no coeficiente de determinação (R²). Na obtenção das equações e dos gráficos, foi utilizado o software SigmaPlot versão 12.0 (Systat Software Inc, Germany). Na análise de variância, foi utilizado o software StatPlus 5.0 (AnalystSoft Inc, Canada).

Os dados de qualidade dos grãos de cevada ainda foram submetidos a análise multivariada, utilizando-se Análise de Componentes Principais, no software Statistics Version 29.0.0.0 software (IBM Corporation, USA).

4. RESULTADOS

Na Tabela 2, são apresentados os dados referentes ao processo de saturação do ozônio em grãos de cevada, nas vazões de entrada do gás de 1,0 e 2,0 m³ m min⁻¹ t⁻¹. Para a vazão específica de 1,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, o tempo saturação e a concentração da saturação foram 337,8 min e de 0,39 mg L⁻¹, respectivamente. Por outro lado, tempo saturação e a concentração da saturação da vazão específica de 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹ foram de 105,6 min e 0,49 mg L⁻¹, respectivamente (Tabela 2). Na Figura 1 é possível observar as curvas referentes à concentração residual de gás ozônio em função do tempo, durante o processo de saturação da cevada, onde mostra consumo de ozônio pela massa de grãos nas vazões específicas de 1 e 2 m³ min⁻¹ t⁻¹.

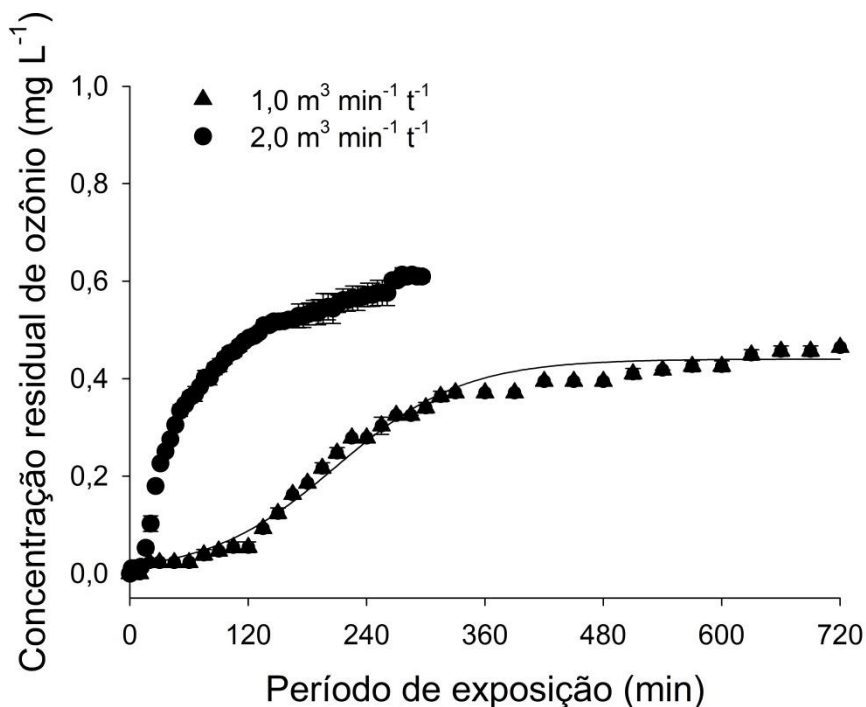
Tabela 2: Equações de regressão e respectivos coeficientes de determinação (R^2) de concentração residual do ozônio em função do tempo de exposição em grãos de cevada, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ (C_0) e vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$.

Vazão específica ($\text{m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$)	Equações ajustadas	R^2	EPE	t_{Sat} (min)	C_{Sat} (mg L^{-1})	C_{Sat}/C_0
1,0	$\hat{y} = \frac{0,440}{1+e^{-\left(\frac{x-209,163}{64,390}\right)}}$	0,98	0,026	337,9	0,39	0,39
2,0	$\hat{y} = \frac{0,558}{1+e^{-\left(\frac{x-51,951}{26,840}\right)}}$	0,95	0,040	105,6	0,49	0,49

EPE – Erro padrão da estimativa; t_{Sat} – tempo de saturação (min); C_{Sat} – concentração de saturação (mg L^{-1}); C_{Sat}/C_0 – relação entre C_{Sat} e C_0 .

Verificou-se que quando se eleva a vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ para $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, há expressiva redução do tempo de saturação, associado ao aumento da concentração de saturação. O tempo de saturação do ozônio em cevada, na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ é aproximadamente 3,2 vezes maior comparado ao obtido na vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Por outro lado, a concentração de saturação na vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ é aproximadamente 1,3 vezes maior aquela obtida na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$.

Figura 1: Curvas de regressão de concentração residual do ozônio em função do tempo de exposição em grãos de cevada, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ (C_0) e vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$



Na Tabela 3, tem-se as equações de regressão referentes aos modelos de cinética de decomposição do ozônio, em grãos de cevada, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$ (C_0) e vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. A escolha do modelo adequado para descrever a cinética de decomposição do ozônio em cevada foi em função do coeficiente de determinação (R^2), mesmo procedimento adotado por Ravi et al. (2015). O modelo que melhor se ajustou aos dados foi o de primeira ordem, utilizado para obter a meia-vida do ozônio no meio poroso. As meias-vidas do ozônio para as vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ foram iguais a $4,0$ e $5,3$ min, respectivamente.

Tabela 3: Equações de regressão referentes aos modelos cinéticos de decomposição ajustadas aos dados de concentração residual do ozônio em função do tempo, em grãos de cevada, para concentração de entrada de 1,0 mg L⁻¹ (C₀) e vazões específicas de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹

Vazão específica (m ³ min ⁻¹ t ⁻¹)	Ordem	Equações ajustadas	R ²	EPE	Meia vida (min)
1,0	0	$\hat{y} = 0,247 - 0,015^{**} x$	0,68	0,065	-
	1	$\hat{y} = -1,146 - 0,172^{**} x$	0,99	0,125	4,0
	2	$\hat{y} = -11,244 + 3,962^{**} x$	0,83	11,567	-
2,0	0	$\hat{y} = 0,226 - 0,011^{**} x$	0,59	0,077	-
	1	$\hat{y} = -1,347 - 0,132^{**} x$	0,96	0,215	5,3
	2	$\hat{y} = -9,681 + 3,256^{**} x$	0,76	14,795	-

** Significativo a 1% de probabilidade. EPE – Erro padrão da estimativa.

Na Tabela 4, tem-se os valores médios referentes a germinação (%), teor de água (%) e condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$). Verificou-se variação significativa ($p < 0,05$) em decorrência da interação entre vazão específica de ar e tempo de exposição para as variáveis germinação e condutividade elétrica. Na Tabela 5, observa-se que houve variação significativa ($p < 0,05$) do teor de água somente devido ao tempo de exposição. Para as variáveis capacidade germinativa, sensibilidade à água e absorção de água, não houve variação significativa ($p > 0,05$) para interação entre vazão específica de ar e tempo de exposição ou os fatores isoladamente

Tabela 4: Valores médios referentes aos testes de germinação (%), de capacidade germinativa (%), de sensibilidade à água (%), de teor de água (%), de absorção de água (%) e de condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h

Vazão específica (m^3 $\text{min}^{-1} \text{ t}^{-1}$)	Tempo de exposição (h)				Média
	0	8	16	24	
	Germinação (%)				
1,0	95,0±1,4Aa	88,0±7,2Aa	97,3±1,1Aa	93,3±1,2Aa	93,3±5,0
2,0	95,0±1,4Aa	92,7±4,2Aa	82,0±8,0Bb	80,7±6,1Bb	86,9±8,1
Média	95,0±1,2	90,3±5,9	89,7±9,8	87,0±8,0	
	Capacidade germinativa (%)				
1,0	98,0±3,5	97,3±3,1	97,3±3,0	94,7±2,9	96,8±3,0
2,0	98,0±3,5	98,7±1,2	96,0±3,5	94,7±5,0	96,8±3,5
Média	98,0±3,1	98,0±2,2	96,7±3,0	94,7±3,8	
	Sensibilidade à água (%)				
1,0	24,3±5,5	23,3±8,1	23,7±5,9	36,3±5,9	26,9±7,9
2,0	24,3±5,5	26,3±8,9	30,7±7,6	32,7±8,5	28,5±9,1
Média	24,3±4,9	24,8±8,9	27,2±7,2	34,5±6,8	
	Teor de água (%)				
1,0	13,6±0,3	12,4±0,2	12,3±0,1	11,7±0,2	12,5±0,7
2,0	13,60±0,3	11,5±0,5	11,9±0,3	11,5±0,2	12,1±1,0
Média	13,6±0,3a	12,0±0,6b	12,1±0,3b	11,6±0,3b	
	Absorção de água (%)				
1,0	63,0±2,7	57,4±0,1	57,4±0,1	62,0±6,3	59,2±4,7
2,0	63,0±2,7	70,4±8,8	63,3±3,1	66,1±3,7	65,7±7,7
Média	63,0±2,4	63,9±9,1	58,9±9,6	64,1±5,2	
	Condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$)				
1,0	60,8±7,6Aa	47,6±5,7Bb	49,4±1,5Bb	58,7±4,9Aab	54,1±7,5
2,0	60,8±7,6Aa	64,9±3,0Aa	68,8±3,2Aa	63,3±2,8Aa	64,4±4,9
Média	60,8±6,8	56,3±10,4	59,1±10,9	61,0±4,3	

Valores médios seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente ($p>0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No que se refere à germinação (Tabela 4), não houve diferença significativa, quando se compararam os valores médios obtidos nos diferentes tempos de exposição ao gás, quando se adotou a vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Todavia, para a vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, verificou-se redução da germinação, quando se adotaram os tempos de exposição de 16 e 24 h, em comparação as amostras não ozonizadas (0 h). Tem-se ainda que tempos de exposição ao ozônio de 16 e 24 h, na vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, implica em menor percentual de germinação, quando comparados com aqueles obtidos na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Quanto à variável condutividade elétrica, destaca-se os menores valores observados nos tempos de exposição de 8 e 16 h, na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, em comparação com as amostras não ozonizadas e aquelas ozonizadas por 24 h. Exposição de grãos de cevada ao ozônio na vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ não acarretou alteração da condutividade elétrica, com o aumento do tempo de exposição.

Com relação ao teor de água (Tabela 4), observou-se redução dos valores médios, à medida que se elevou o tempo de exposição ao ozônio. A capacidade germinativa (%) dos grãos permaneceram com valores superiores a 94%. Os valores médios de sensibilidade à água permaneceram na faixa entre $23,3 \pm 8,1$ e $36,3 \pm 5,9\%$. Quando a absorção da água, foram obtidos valores entre $57,4 \pm 0,1$ e $70,4 \pm 8,8\%$.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores médios referentes à luminosidade (L^*), tonalidade de cor (h^*), saturação de cor (C^*) e diferença de cor (ΔE^*) em grãos de cevada submetidos a ozonização, nas diferentes combinações de vazão específica e tempo de exposição, para concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$. Onde verificou-se variação significativa ($p < 0,05$) em decorrência da interação entre vazão específica de ar e tempo de exposição, para as variáveis Saturação de cor (C^*) e diferença de cor (ΔE^*) (tabela 4). Para variável luminosidade (L^*) houve variação significativa ($p < 0,05$) em decorrência da vazão específica de ar e do tempo de exposição isoladamente, em contrapartida a tonalidade de cor (h^*), houve variação significativa ($p < 0,05$) somente devido a vazão específica isoladamente (tabela 5).

A saturação de cor dos grãos aumentou à medida que se elevou o tempo de exposição ao ozônio de 8h para 16h, na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ (Tabela 6). Essa tendência não foi observada na vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Destaca-se ainda os maiores valores de saturação de cor nos grãos ozonizados por 16 e 24 h, na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$. Comportamento semelhante foi observado na

variável diferença de cor, com alterações mais expressivas na vazão específica de 1,0 m³ min⁻¹ t⁻¹ e nos tempos de exposição de 16 e 24 h. Valores de ΔE^* acima de 1,5 tem-se a percepção nítida na diferença de cor entre os grãos tratados e não tratados com ozônio.

Tabela 5: Valores médios referentes à luminosidade (L*), tonalidade de cor (h*), saturação de cor (C*) e diferença de cor (ΔE^*) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de 1,0 mg L⁻¹, vazões específicas de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, por, por até 24 h

Vazão específica (m ³ min ⁻¹ t ⁻¹)	Tempo de exposição (h)				Média
	0	8	16	24	
	Luminosidade (L*)				
1,0	61,4±1,0	62,8±1,0	64,5±0,2	63,2±1,1	63,2±1,5A
2,0	61,4±1,0	62,6±0,7	62,2±1,8	62,6±0,7	62,2±1,1B
Média	61,4±0,9b	62,7±0,8ab	63,4±1,7a	63,2±1,1a	
	Tonalidade de cor (h*)				
1,0	78,6±0,9	80,3±1,6	80,5±0,1	80,2±0,2	79,9±1,1A
2,0	78,6±0,9	78,4±1,2	78,6±1,6	78,4±1,2	78,5±1,1B
Média	78,6±0,8	79,4±1,7	79,6±1,5	79,3±1,3	
	Saturação de cor ou croma (C*)				
1,0	15,7±0,8Ab	15,6±0,6Ab	18,7±0,9Aa	18,6±0,3Aa	17,1±1,7
2,0	15,7±0,8Aa	15,4±1,1Aa	17,0±1,0Ba	15,2±0,8Ba	15,9±1,1
Média	15,7±0,7	15,5±0,8	17,9±1,2	16,9±1,9	
	Diferença de cor (* ΔE)				
1,0	0,0±0,0Ab	1,4±0,6Ab	7,4±1,1Aa	7,6±0,7Aa	4,1±3,7
2,0	0,0±0,0Aa	1,6±0,5Aa	2,6±0,2Ba	1,6±1,0Ba	1,5±1,1
Média	0,0±0,0	1,5±1,4	5,0±3,1	4,6±3,5	

Valores médios seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os valores médios de L* indicaram que não houve interação entre a vazão específica e o tempo de exposição dos grãos de cevada ao ozônio ($p > 0,05$). Entretanto, foi observado que o valor L* diminuiu na vazão de 2 m³ min⁻¹ t⁻¹ indicando uma coloração amarelada ligeiramente mais escura ($p < 0,05$), independente do tempo de exposição. Observa-se que com 16h e 24h de exposição ao gás, os valores

de L^* aumentaram e os grãos de cevada apresentaram tonalidade da coloração amarelada mais claros ($p < 0,05$) quando comparados com os grãos não tratados com ozônio, independente da vazão utilizada.

Houve uma sutil mudança no ângulo de tonalidade (valor h^*) entre as vazões específicas ($p < 0,05$), mas que está dentro do intervalo da tonalidade amarelada apresentada pelos grãos. No entanto, obteve-se variação significativa ($p < 0,05$) da saturação de cor (valor C^*) e da diferença de cor (ΔE^*) dos grãos, em decorrência da interação entre vazão específica e tempo de exposição.

Com relação a tonalidade de cor, a ozonização dos grãos na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ ocasionou maior valor médio ($79,9 \pm 1,1$), quando comparado com o resultado verificado na vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ ($78,5 \pm 1,1$), porém sem diferença estatística.

Apresentam-se, na Tabela 6, os resultados obtidos referentes a massas frescas da raiz (MFR) em grãos de cevada submetidos ou não a ozonização, nas vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h.

Tabela 6: Valores médios referentes às massas frescas da parte aérea (MFPA - g) e da raiz (MFR - g) e às massas secas da parte aérea (MSPA - g) e da raiz (MSR - g) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de 1,0 mg L⁻¹, vazões específicas de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, por até 24 h

Vazão específica (m ³ min ⁻¹ t ⁻¹)	Tempo de exposição (h)				Média
	0	8	16	24	
Massa fresca – parte aérea (MFPA - g)					
1,0	2,13±0,11	2,13±0,07	2,17±0,12	2,16±0,20	2,15±0,12
2,0	2,13±0,11	2,14±0,11	2,09±0,20	1,95±0,20	2,08±0,15
Média	2,13±0,11	2,13±0,08	2,13±0,15	2,05±0,20	
Massa fresca – raiz (MFR - g)					
1,0	0,71±0,08	1,63±0,61	1,29±0,06	1,07±0,17	1,17±0,44
2,0	0,71±0,08	1,29±0,03	1,08±0,23	0,88±0,22	0,99±0,27
Média	0,71±0,07c	1,46±0,42a	1,19±0,42ab	0,97±0,20bc	
Massa seca – parte aérea (MSPA - g)					
1,0	0,19±0,01	0,17±0,01	0,18±0,01	0,18±0,02	0,18±0,01
2,0	0,19±0,01	0,17±0,01	0,17±0,01	0,17±0,03	0,18±0,02
Média	0,19±0,01	0,17±0,01	0,17±0,01	0,17±0,01	
Massa seca – raiz (MSR - g)					
1,0	0,13±0,01	0,15±0,01	0,15±0,01	0,14±0,01	0,14±0,02
2,0	0,13±0,01	0,14±0,01	0,13±0,01	0,14±0,03	0,14±0,02
Média	0,13±0,01	0,15±0,01	0,14±0,01	0,14±0,01	

Valores médios seguidos de mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha não diferem estatisticamente ($p>0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Não houve variação significativa ($p>0,05$) nas variáveis massa fresca da parte aérea, massa seca da parte aérea e massa seca da raiz, devido à interação entre vazão específica e tempo de exposição ao ozônio ou os fatores isoladamente. Todavia, houve variação significativa ($p<0,05$) da massa fresca da raiz devido o tempo de exposição independente da vazão específica.

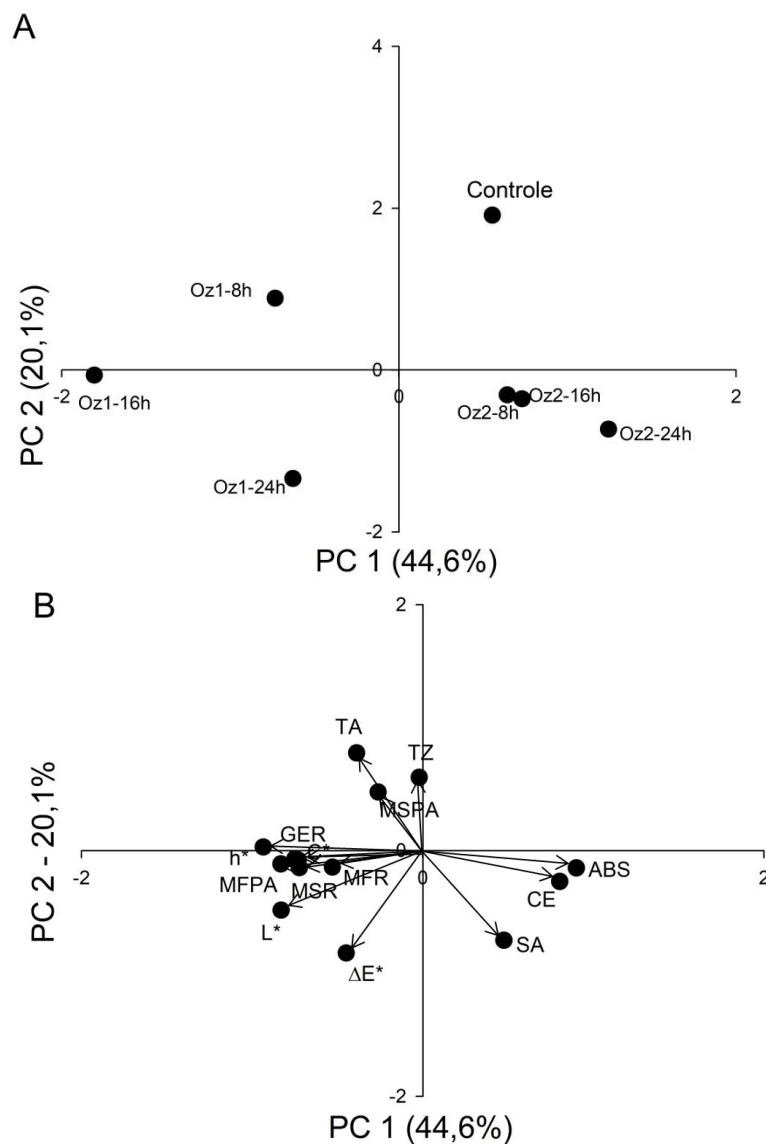
Com relação ao efeito do tempo de exposição ao ozônio isoladamente na variável massa fresca da raiz (Tabela 6), destaca-se o maior valor médio obtidos no tempo de exposição de 8 h, que foi estatisticamente superior aos obtidos nos grãos não ozonizados (0 h) (0,71±0,07 g) e ozonizados por 24 h (0,97±0,20 g). Os valores

médios de massa fresca da parte aérea variaram entre $1,95 \pm 0,20$ e $2,17 \pm 0,12$ g. Com relação aos valores médios da massa seca da parte aérea, obtiveram-se valores entre $0,17 \pm 0,01$ e $0,19 \pm 0,01$ g. Quanto à massa seca da raiz, obtiveram-se valores médios na faixa entre $0,13 \pm 0,01$ e $0,15 \pm 0,01$ g.

Na Figura 2, é apresentada a Análise de Componentes Principais, considerando-se às diferentes combinações de vazão específica e tempo de exposição ao ozônio e variáveis de qualidade de grãos de cevada. Observa-se que as soma das componentes principais (PC1 e PC2) explicaram 64,70% da variação. É possível observar os diferentes tratamentos foram distribuídos nos quatro quadrantes. No primeiro quadrante, tem-se o tratamento controle (grãos não ozonizados). O tratamento referente aos grãos ozonizados na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ por 8 h (Oz1-8h) está localizado no segundo quadrante. Por outro lado, os tratamentos Oz1-16h e Oz1-24h (vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ por 16 e 24 h, respectivamente) permaneceram no terceiro quadrante. Quando aos tratamentos referentes à vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por 8 (Oz2-8h), 16 (Oz2-16h) e 24 h (Oz2-24h), verificou-se que os mesmos permaneceram no quarto quadrante. No que se refere aos vetores das variáveis associadas aos componentes PC1 e PC2, verificou-se a seguinte ordenação: segundo quadrante – capacidade germinativa (TZ), teor de água (TA) e massa seca da parte aérea (MSPA); terceiro quadrante – germinação (GER), tonalidade de cor (h^*), saturação de cor (C^*), diferença de cor (ΔE^*), massa seca da raiz (MSR), massa fresca da parte aérea (MFPA) e massa fresca da raiz (MSR); e quarto quadrante - sensibilidade à água (SA), condutividade elétrica (CE) e absorção de água (AA).

Apresentam-se, na Tabela 7, as equações dos componentes 1 (PC1) e 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA) referentes aos grãos expostos ao ozônio nas diferentes combinações de vazão específica e tempo de exposição. Na PC1, as variáveis que mais contribuíram foram sensibilidade à água (SA), massa fresca da parte aérea, condutividade elétrica e germinação, com *loadings* ou coeficientes da equação iguais $+0,90$, $0,83$, $+0,80$ e $-0,75$, respectivamente (Tabela 7). No que tange a PC2, destacaram-se as variáveis diferença de cor (ΔE^*), capacidade germinativa (TZ) e Absorção de Água (A), obtendo-se *loadings* iguais a $-0,83$, $+0,79$ e $-0,73$, respectivamente.

Figura 2: Análise de componentes principais grãos de cevada expostos ou não ao ozônio na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h. A) PCA dos tratamentos; B) PCA das variáveis



Tratamentos: Controle (grãos ozonizados); Oz1-8h – ozônio- $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$; ozônio-Oz1-16h – $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/16 \text{ h}$; Oz1-24h – ozônio- $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24 \text{ h}$; Oz2-8h – ozônio- $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$; Oz2-16h – ozônio- $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/16 \text{ h}$; Oz2-24h – ozônio- $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24 \text{ h}$. Variáveis: ABS – Absorção de Água; CE – Condutividade Elétrica; C* - Saturação de cor ou Cromo; ΔE^* - Diferença de Cor; GER – Germinação; h* - Tonalidade de Cor; L* - Luminosidade; MFPA – Massa fresca da parte aérea; MFR - Massa fresca da raiz; MSPA - Massa seca da parte aérea; MSE - Massa seca da raiz ; SA – Sensibilidade à Água; TZ – Capacidade Germinativa; TA – Teor de Água.

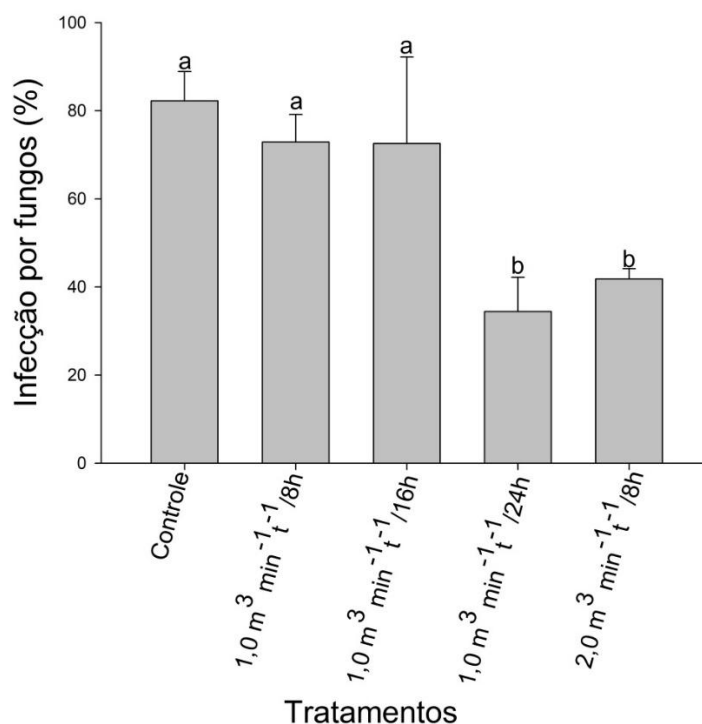
Tabela 7: Equações dos componentes 1 (PC1) e 2 (PC2) da Análise de Componentes Principais (PCA) para grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, vazões específicas de $1,0$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por até 24 h

Componente	Equações
PC1	$PC1 = 0,47ABS + 0,80CE - 0,73C^* - 0,45 \Delta E^* - 0,75GER - 0,93h^* - 0,83L^* - 0,83MFPA - 0,53MFR - 0,26MSPA - 0,72MSR + 0,90SA - 0,39TZ - 0,02TA$
PC2	$PC2 = -0,73ABS - 0,25CE - 0,08C^* - 0,83 \Delta E^* - 0,07GER + 0,03h^* - 0,49L^* - 0,11MFPA - 0,14MFR + 0,48MSPA - 0,14MSR + 0,14SA + 0,79TZ + 0,60TA$

ABS – Absorção de Água; CE – Condutividade Elétrica; C^* - Saturação de cor ou Croma; ΔE^* - Diferença de Cor; GER – Germinação; h^* - Tonalidade de Cor; L^* - Luminosidade; MFPA – Massa fresca da parte aérea; MFR - Massa fresca da raiz; MSPA - Massa seca da parte aérea; MSE - Massa seca da raiz; SA – Sensibilidade à Água; TZ – Capacidade Germinativa; TA – Teor de Água.

Na Figura 3, tem-se o percentual de infecção por fungos nos grãos de cevada, submetidos aos diferentes tratamentos. Verificou-se diferença significativa entre os tratamentos ($p < 0,05$), sendo os menores valores obtidos quando se adotaram as combinações $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24 \text{ h}$ ($34,4 \pm 7,8\%$) e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$ ($41,9 \pm 2,3$). Por outro lado, o percentual de infecção por fungos nos grãos não tratados (controle) foi de $82,2 \pm 9,4\%$. Salienta-se que os grãos de cevada foram previamente inoculados com isolado de *F. graminearum* e que antes da inoculação, o percentual de infecção era de $27,8 \pm 9,8\%$.

Figura 3: Infecção por fungos (%) em grãos de cevada expostos ao gás ozônio, na concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, em diferentes combinações de vazões específicas e tempo de exposição



Valores médios seguidos de mesma letra não diferem estatisticamente ($p > 0,05$), de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5. DISCUSSÃO

No presente estudo, foi caracterizado o processo de saturação do gás ozônio em meio poroso de grãos de cevada, nas vazões específicas de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹ (Tabela 2 e Figura 1). Verificou-se que o processo de saturação é dependente da vazão específica do ar. Aumento da vazão específica implica na redução do tempo de saturação e no aumento da concentração de saturação do gás no meio poroso. O comportamento observado no que se refere à concentração residual em função do tempo foi semelhante ao obtido por outros autores, em grãos como amendoim, milho comum, milho de pipoca e feijão caupi (Alencar et al., 2011; Souza et al., 2018; Silva et al., 2019; Abreu et al., 2020). De acordo com os estudos de Kells et al. (2001) e Mendez et al. (2003), o transporte do gás ozônio na massa de grãos é altamente reativo e ocorre em duas etapas. Inicialmente, o gás reage com os sítios ativos na superfície dos grãos, o que acelera a degradação do ozônio devido à sua reação com os grãos. À medida que o ozônio é distribuído na massa de grãos, o gás reage com os sítios ativos na superfície do produto, resultando na redução da taxa de degradação. Isso explica no aumento da concentração de ozônio no espaço intergranular, à medida que se eleva o tempo de ozonização (Kells et al., 2001; Mendez et al., 2003).

No que se refere a cinética de decomposição do ozônio no meio poroso, obteve-se meias-vidas de 4,0 e 5,3 min, para as vazões específicas de 1,0 e 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, respectivamente (Tabela 3). Esses valores são inferiores aos obtidos por Alencar et al. (2011) para amendoim (7,7 min/25 °C) e por Souza et al. (2018) para milho comum (10,50 min/25 °C). Por outro lado, Souza et al. (2018) obtiveram meia-vida equivalente a 0,16 min (25 °C) para milho superdoce. Esses resultados indicam que a decomposição do ozônio é dependente das características do meio, especialmente no que se refere às propriedades físicas e composição química, em se tratando de grãos (Souza et al., 2018; Oliveira et al., 2020). Ressalta-se que a meia-vida do ozônio no ar é na faixa entre 20-40 min (Kells et al., 2001).

Com relação à qualidade dos grãos foi possível obter combinações de vazão específica e tempo de exposição que não ocasionam alterações indesejáveis nos grãos. O ozônio não alterou a germinação dos grãos, quando adotada a vazão específica de 1,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, por até 24 h (Tabela 3). Por outro lado, na vazão específica de 2,0 m³ min⁻¹ t⁻¹, houve decréscimo da germinação em tempos de

exposição de 16 e 24 h. Essas alterações indesejáveis podem estar associadas ao efeito tóxico do ozônio em condições de aplicação inadequadas, causando interação excessiva com os grãos e danificar componentes celulares, como lipídios, proteínas e ácidos nucleicos. O gás pode alterar estruturas celulares, membranas, atividade enzimática e integridade do DNA, e, conseqüentemente, dificultar os processos de germinação e potencialmente levar à redução de qualidade (Wawrzyniak et al., 2020). É importante mencionar que alguns autores observaram efeito positivo do ozônio em milho, com elevação do percentual de germinação e do vigor (Violleau et al., 2008; Monteiro et al., 2021; Rosa et al., 2022). Isso reforça a necessidade de se determinar as condições adequadas de aplicação do ozônio para os diferentes produtos.

A integridade física de grãos e sementes pode ser mensurada indiretamente pela correlação com valores de condutividade elétrica (Vieira et al., 2001; Fessel et al., 2006). No presente estudo, obteve-se menores valores de condutividade elétrica nos grãos ozonizados, quando adotada a vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por 8 e 16 h (Tabela 4). Essa redução é benéfica no que se refere a qualidade dos grãos. Resultado semelhante foi obtido por Monteiro et al. (2021) em grãos de milho expostos a água ozonizada. Entretanto, ainda é necessário elucidar a razão pela qual pode ocorrer redução da condutividade elétrica em determinadas condições de ozonização. Por outro lado, Silva et al. (2019) demonstraram que a aplicação do gás ozônio pode acarretar o aumento da condutividade elétrica em grãos de milho de pipoca. O aumento da condutividade elétrica em grãos ozonizados é dependente da concentração de entrada do gás e do tempo de exposição (Silva et al., 2019; Siteo et al., 2023).

No que se refere ao teor de água dos grãos (Tabela 5), a redução observada pode ser explicada pelo fato de ter sido adotadas vazões específicas na faixa utilizada na secagem de grãos a baixa temperatura, entre $1,0$ e $10 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ (Silva, 2008). Quanto à cor dos grãos, verificou-se que a aplicação do ozônio acarreta alteração expressiva, especialmente na vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ (Tabela 6). As modificações mais expressivas foram observadas quando se analisaram as variáveis saturação de cor e diferença de cor. A alteração na cor em produtos ozonizados, como grãos e castanhas, já foi associada à degradação de pigmentos na casca ou película que envolve o produto. A saturação de cor ou croma (C^*) é definido como uma medida da intensidade de cor ou de saturação, e varia de cores pálidas (valor baixo) para cores vivas (valor alto) (Goyenèche et al., 2014). Nesse sentido, a ozonização implicou

em grãos com cor mais viva ou intensa. No que se refere à diferença de cor, foram obtidos valores superiores a 7,0 ($1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, por 16 e 24 h) e, conforme Altmann et al. (2022), são alterações que podem ser perceptíveis aos consumidores. Resultados semelhantes foram observados em amendoim (Alencar et al., 2011) e castanha-do-Brasil (Oliveira et al., 2020). Mas esses autores não indicaram que tais alterações inviabilizam a comercialização dos produtos.

A Análise de Componentes Principais (PCA) confirmou o efeito do ozônio na qualidade da cevada, aplicado nas diferentes combinações de vazão específica e tempo de exposição (Figura 2). É importante mencionar que o objetivo da PCA é reduzir a dimensionalidade de um conjunto de dados, projetando-os em um espaço de menor dimensão enquanto preserva as relações entre as amostras. Além disso, a técnica agrupa os elementos da pesquisa de acordo com suas características e similaridades (Hongyu; Sandanielo; Junior, 2015). Nesse sentido, os diferentes tratamentos foram segregados nos quatro diferentes quadrantes (Figura 2). As combinações que envolveram a vazão específica de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ localizaram-se no segundo e no terceiro quadrante. Em contrapartida, o tratamento controle permaneceu no primeiro quadrante e aqueles relacionados à vazão específica de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ no quarto quadrante.

No presente estudo, foi possível determinar a eficácia do ozônio no controle de fungos nos grãos de cevada (Figura 3). Menciona-se que, para isso, os grãos foram inoculados com *F. graminearum*, espécie que se destaca pelo potencial de produzir micotoxinas, dentre as quais desoxinivalenol (DON) e zearalenona (ZEA) (Chen et al., 2019). Esses compostos pertencem ao grupo de micotoxinas predominantes em malte de cevada (Pascari et al., 2019). Conforme apresentado na Figura 3, as combinações de vazão específica e tempo de exposição ao ozônio que acarretaram maior eficácia no controle dos fungos foram $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24 \text{ h}$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$. Salienta-se que a inativação de fungos nos grãos de cevada, especialmente de *F. graminearum*, favorece o controle da contaminação por micotoxinas durante a etapa da produção do malte (Ng et al., 2021). De acordo com Van Nierop et al. (2006), durante o processo de produção do malte, tem-se condições favoráveis para o desenvolvimento dos microrganismos e produção de micotoxinas, relacionadas à temperatura, à umidade e ao fluxo de ar. Os fungos ainda podem ocasionar outras alterações indesejáveis no malte, tais como diminuição da filtrabilidade do mosto e formação de espuma em excesso (Mastanjević et al. 2018; Shokribousjein et al. 2011; Ng et al., 2021).

A eficácia do ozônio no controle de microrganismos está relacionada ao elevado potencial oxidativo (2,07 mV) (Guzel-Seydim; Greene; Seydim 2004). Esse gás é capaz de interagir com constituintes celulares vitais, tais como membrana celular e parede celular, além enzimas e ácidos nucleicos, que são elementos do conteúdo celular (Pascual; Llorca; Canut ., 2007; Cullen et al., 2009). Resultados semelhantes foram observados por Sanchez et al. (2024), que determinaram a eficácia do ozônio no controle de fungos em cevada, considerando-se fatores como temperatura, umidade relativa e teor de água dos grãos. Outros autores também observaram que o ozônio é eficaz no controle de fungos em diferentes tipos de grãos, tais como amendoim (Alencar et al., 2012), arroz (Beber-Rodrigues et al. 2015; Santos et al., 2016), feijão (Siteo et al., 2024), milho (Uzoma et al., 2024) e trigo (Wu et al., 2006).

No presente estudo, foi possível determinar combinações de vazão específica do ar e tempo de exposição ao ozônio adequadas para inativar fungos em grãos de cevada, sem ocasionar alterações indesejáveis no produto. Em trabalhos futuros, sugere-se avaliar o efeito da ozonização na malteação e na qualidade do malte. Como o ozônio, em função das condições de tratamento, pode acarretar efeitos positivos ou negativos no que se refere a germinação dos grãos, o tempo de germinação durante a malteação pode ser influenciado. Além disso, é importante determinar o efeito do ozônio na qualidade da cerveja.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitiram concluir que:

- i. O processo de saturação de meio poroso com cevada é influenciado pela vazão específica do ar.
- ii. O modelo cinético de primeira ordem é o mais adequado para descrever a decomposição do ozônio em meio poroso de cevada.
- iii. Tratamento de cevada com ozônio, na vazão específica do ar de $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ e concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, por até 24 h, não acarreta alterações indesejáveis na qualidade dos grãos.
- iv. Vazão específica de ar de $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ e concentração de entrada de $1,0 \text{ mg L}^{-1}$, associadas a tempos de ozonização igual ou superior a 16 h não é adequado para grãos de cevada.

- v. É possível o controle eficaz de fungos em grãos cevada, especialmente *F. graminearum*, adotando-se as seguintes combinações de vazão específica do ar e tempo de exposição ao ozônio: $1,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/24\text{h}$ e $2,0 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}/8 \text{ h}$.

REFERÊNCIAS

- BREU, A. O.; FARONI, L. R. D. A.; DE ASSIS SILVA, M. V.; DE SOUSA, A. H.; DE ALENCAR, E. R.; SILVA, G. N. Ozone as an alternative fumigant for controlling *Callosobruchus maculatus* (F.) (Coleoptera: Chrysomelidae) in cowpea beans. **Journal of Stored Products Research**, v. 97, p. 101969, 2022.
- AFSAH-HEJRI, L.; HAJEB, P.; EHSANI, R. J. Application of ozone for degradation of mycotoxins in food: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 19, n. 4, p. 1777-1808, 2020.
- AIDOO, O. F.; OSEI-OWUSU, J.; CHIA, S. Y.; DOFUOR, A. K.; ANTWI-AGYAKWA, A. K.; OKYERE, H.; BORGEMEISTER, C. Remediation of pesticide residues using ozone: A comprehensive overview. **Science of the Total Environment**, v. 894, p. 164933, 2023.
- ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D.; MARTINS, M. A.; COSTA, A. R.; CECON, P. R. Decomposition kinetics of gaseous ozone in peanuts. **Engenharia Agrícola**, v. 31, p. 930-939, 2011.
- ALLEN, B.; WU, J.; DOAN, H. Inactivation of fungi associated with barley grain by gaseous ozone. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 38, n. 5, p. 617-630, 2003.
- ALTMANN, B. A.; GERTHEISS, J.; TOMASEVIC, I.; ENGELKES, C.; GLAESENER, T.; MEYER, J.; SCHÄFER, A.; WIESEN, R.; MÖRLEIN, D. Human perception of color differences using computer vision system measurements of raw pork loin. **Meat Science**, v. 188, 108766, 2022.
- ARENDDT, E. K.; ZANNINI, E. **Cereal grains for the food and beverage industries**. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. 512 p.
- BATAKLIEV, T.; GEORGIEV, V.; ANACHKOV, M.; RAKOVSKY, S.; ZAIKOV, G. E. Ozone decomposition. **Interdisciplinary Toxicology**, v. 7, 2014.
- BEBER-RODRIGUES, M.; SAVI, G. D.; SCUSSEL, V. M. Ozone effect on fungi proliferation and genera susceptibility of treated stored dry paddy rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Food Safety**, v. 35, n. 1, p. 59-65, 2015.
- BENEŠOVÁ, K.; BOŠKO, R.; BĚLÁKOVÁ, S.; PLUHÁČKOVÁ, H.; KŘÁPEK, M.; PERNICA, M.; SVOBODA, Z. Contaminação natural da cevada tcheca com micotoxinas em conexão com a variabilidade climática. **Controle Alimentar**, v. 140, p. 109139, 2022.

BERWIAN, G. F.; REMPEL, A.; GARDA-BUFFON, J.; COLLA, L. M. Use of residual barley to bioethanol production: Valorization, mycotoxins decontamination and feed production. **Bioresource Technology Reports**, 101878, 2024.

CHAMPEIL, A.; DORE, T.; FOURBET, J. Fusarium head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by Fusarium in wheat grains. **Plant Science**, v. 166, p. 1389–1415, 2004.

CHAPLESKI, R. C.; ZHANG, Y.; TROYA, D.; MORRIS, J. R. Heterogeneous chemistry and reaction dynamics of the atmospheric oxidants, O₃, NO₃, and OH, on organic surfaces. **Chemical Society Reviews**, v. 45, p. 3731-3746, 2016.

CHEN, C.; LIU, C.; JIANG, A.; ZHAO, Q.; LIU, S.; HU, W. Effects of ozonated water on microbial growth, quality retention and pesticide residue removal of fresh-cut onions. **Ozone: Science & Engineering**, v. 42, p. 399-407, 2020.

CHEN, Y.; KISTLER, H. C.; MA, Z. *Fusarium graminearum* trichothecene mycotoxins: biosynthesis, regulation, and management. **Annual Review of Phytopathology**, v. 57, n. 1, p. 15-39, 2019.

CHENG, S. J.; JIANG, Y. Z.; LI, M. H.; LO, H. Z. A mutagenic metabolite produced by *Fusarium moniliforme* isolated from Linxian County, China. **Carcinogenesis**, v. 6, p. 903–905, 1985.

CHITTEM, K.; MATHEW, F. M.; GREGOIRE, M.; LAMPPA, R. S.; CHANG, Y. W.; MARKELL, S. G.; BRADLEY, C.; BARASUBIYE, T.; GOSWAMI, R. S. Identificação e caracterização de Fusarium spp. associadas à podridão das raízes da ervilha em Dakota do Norte. **European Journal of Plant Pathology**, v. 143, p. 641–649, 2015.

CULLEN, P. J.; TIWARI, B. K.; O'DONNELL, C. P.; MUTHUKUMARAPPAN, K. Modelling approaches to ozone processing of liquid foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 20, n. 3-4, p. 125-136, 2009.

DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. A.; SOARES, N. D. F. F.; DA SILVA, W. A.; DA SILVA CARVALHO, M. C. Efficacy of ozone as a fungicidal and detoxifying agent of aflatoxins in peanuts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 4, p. 899-905, 2012.

DE 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.; LEANDRO, E. D. S.; MENDONÇA, M. A.; MOSCON, E.S.; BIZERRA, L. V. A. D. S.; 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- FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY**, v. 123, 109106, 2020.

DUBUIS, M. E.; DUMONT-LEBLOND, N.; LALIBERTÉ, C.; VEILLETTE, M.; TURGEON, N.; JEAN, J.; DUCHAINE, C. Ozone efficacy for the control of airborne viruses: Bacteriophage and norovirus models. **PLoS One**, v. 15, n. 4, e0231164, 2020.

EATON, A. D.; CLESCERI, L. S.; GREENBERG, A. E. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20th ed. Washington: APHA/AWWA/WEF, 2000.

EPELLE, E. I.; MACFARLANE, A.; CUSACK, M.; BURNS, A.; OKOLIE, J. A.; MACKAY, W.; YASEEN, M. Ozone application in different industries: A review of recent developments. **Chemical Engineering Journal**, v. 454, p. 140188, 2023.

ESKOLA, M.; KOS, G.; ELLIOTT, C. T.; HAJŠLOVÁ, J.; MAYAR, S. Worldwide contamination of food-crops with mycotoxins: validity of the widely cited 'FAO estimate' of 25. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 60, n. 16, p. 2773–2789, 2019.

ESSERY, R. E.; KIRSOP, B. H.; POLLOCK, J. R. A. Studies in barley and malt: II. Tests for germination and water-sensitivity. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 61, p. 25-28, 1955.

EUROPEAN BREWING CONVENTION. Method 3.5.1. **Germinative capacity of barley: Rapid staining method**. In: Analytica-EBC. p. 1–2, 2005.

EUROPEAN BREWING CONVENTION. Method 3.6.2. **Germination energy of barley: BRF method**. In: Analytica-EBC. p. 1, 1997.

FAGUNDES, M. H. **Sementes de cevada**. 2003. 14 p.

FAI, A. E. C.; DE SOUZA, M. R. A.; BRUNO, N. V.; DE ANDRADE GONÇALVES, É. C. B. Produção de revestimento comestível à base de resíduo de frutas e hortaliças: aplicação em cenoura (*Daucus carota* L.) minimamente processada. **Scientia Agropecuaria**, v. 6, n. 1, p. 59-68, 2015.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the UN**. Database 2022. FAOSTAT. Statistic Division, 2022.

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

FLAVIN, S.; MELTONVILLE, M.; TAVERNER, C.; REID, J.; LAWRENCE, S.; BELLOCH-MOLINA, C.; MORRISSEY, J. Understanding early modern beer: an interdisciplinary case-study. **Historical Journal**, p. 1-34, 2023.

GARBE, L.-A.; SCHWARZ, P.; EHMER, A. Beer gushing. In: BAMFORTH, C. W. (Ed.). **Beer: A quality perspective**. 1st ed. p. 185–212, 2009.

GONZÁLEZ-GARCÍA, S.; MORALES, P. C.; GULLÓN, B. Estimating the environmental impacts of a brewery waste-based biorefinery: Bio-ethanol and xylooligosaccharides joint production case study. **Industrial Crops and Products**, v. 123, p. 331-340, 2018.

GOYENECHÉ, R.; AGÜERO, M. V.; ROURA, S.; DI SCALA, K. Application of citric acid and mild heat shock to minimally processed sliced radish: Color evaluation. **Postharvest Biology and Technology**, v. 93, p. 106-113, 2014.

GRZYBOWSKI, C. R. de S.; OHLSON, O. de C.; SILVA, R. C. da; PANOBIANCO, M. Viability of barley seeds by the tetrazolium test. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 1, p. 47-54, 2012.

GU, Z.; JIN, Z.; SCHWARZ, P.; RAO, J.; CHEN, B. Unraveling the role of germination days on the aroma variations of roasted barley malts via gas chromatography-mass

spectrometry based untargeted and targeted flavoromics. **Food Chemistry**, v. 426, p. 136563, 2023.

GUZEL-SEYDIM, Z. B.; GREENE, A. K.; SEYDIM, A. C. Use of ozone in the food industry. **LWT-Food Science and Technology**, v.37, n.4, p.453-460. 2004.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **E&S - Engineering and Science**, v. 5, n. 1, 2016.

HU, Y.; JIA, F.; LIU, Z.; ZHANG, Y.; LI, L. Impact of storage time on microbial communities and flavor profiles in highland barley grains. **Journal of Stored Products Research**, v. 107, p. 102321, 2024.

ISIKBER, 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, p. 139-145, 2015.

JONES, J. P.; MILLER, W. Murcha de fusarium em tomate. Fla Dept Agric & Consumer Serv, Div of Plant Industry, **Plant Pathology Circular**, n.º 237, 1982.

KAMLE, M.; DEVI, S.; LEE, K. E.; KANG, S. G.; KUMAR, P. Fumonisin: Impacto na agricultura, alimentação e saúde humana e suas estratégias de gestão. **Toxins**, v. 11, p. 328, 2019.

KARANYI, Z.; MISKEI, M. **FSRD: Banco de dados de resposta ao estresse fúngico**. Database, 2013, bat037.

KELLEMS, R. O.; CHURCH, D. C. **Livestock feeds and feeding**. 6. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2010. 711 p.

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

KHATIBI, P. A.; BERGER, G.; WILSON, J.; BROOKS, W. S.; McMASTER, N.; GRIFFEY, C. A.; SCHMALE III, D. G. A comparison of two milling strategies to reduce the mycotoxin deoxynivalenol in barley. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 62, n. 18, p. 4204-4213, 2014.

KUNZE, W. **Technology brewing and malting**. In: HENDEL, O. (Ed.). 3rd ed. Berlin: VLB, 2004.

LANCOVA, K.; HAJŠLOVA, J.; POUŠTKA, J.; KRPLŮVA, A.; ZACHARIASOVA, M.; DOSTÁLEK, P.; SACHAMBULA, L. Transfer of *Fusarium* mycotoxins and 'masked' deoxynivalenol (deoxynivalenol-3-glucoside) from field barley through malt to beer. **Food Additives and Contaminants**, v. 25, n. 6, p. 732-744, 2008.

LATTIN, J.; CARROLL, J. D.; GREEN, P. E. **Análise de dados multivariados**. Tradução de Harue Avritscher. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 456 p.

LÓPEZ-DÍAZ, C.; RAHJOO, V.; SULYOK, M.; GHIONNA, V.; MARTÍN-VICENTE, A.; CAPILLA, J.; DI PIETRO, A.; LÓPEZ-BERGES, M. S. Fusaric acid contributes to virulence of *Fusarium oxysporum* on plant and mammalian hosts. **Molecular Plant Pathology**, v. 19, p. 440-453, 2018.

LU, Q.; GUO, M. Y.; TIAN, J.; LUO, J. Y.; YANG, M. H. Um estudo abrangente sobre triagem de múltiplas micotoxinas, alterações de resíduos de micotoxinas e análise da comunidade fúngica desde a germinação da cevada até o malte. **International Journal of Food Microbiology**, v. 372, p. 109678, 2022.

MAHFOUDH, A.; MOISAN, M.; SÉGUIN, J.; BARBEAU, J.; KABOUZI, Y.; KÉROACK, D. Inactivation of vegetative and sporulated bacteria by dry gaseous ozone. **Ozone: Science & Engineering**, v. 32, n. 3, p. 180-198, 2010.

MALIK, S. N.; GHOSH, P. C.; VAIDYA, A. N.; MUDLIAR, S. N. Hybrid ozonation process for industrial wastewater treatment: Principles and applications: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 35, 2020.

MARSTON, K.; KHOURYIEH, H.; ARAMOUNI, F. Evaluation of sorghum flour functionality and quality characteristics of gluten-free bread and cake as influenced by ozone treatment. **Food Science and Technology International**, v. 21, p. 631-640, 2015.

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.

MASTANJEVIĆ, K.; MASTANJEVIĆ, K.; KRSTANOVIĆ, V. The gushing experience - A quick overview. **Beverages**, v. 3, n. 2, p. 25, 2017.

MASTANJEVIĆ, K.; KRSTANOVIĆ, V.; LUKINAC, J.; MASTANJEVIĆ, K. Impact of Fusarium infection and fungicide treatment on wheat malt wort quality. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 124, n.3, p.204-208. 2018.

MENDEZ, F.; MAIER, D. E.; MASON, L. J.; WOLOSHUK, C. P. Penetration of ozone into columns of stored grains and effects on chemical composition and processing performance. **Journal of Stored Products Research**, v. 39, p. 33-44, 2003.

MONTEIRO, N. O. C.; DE ALENCAR, E. R.; SOUZA, N. O. S.; LEÃO, T. P. Ozonized Water in the Preconditioning of Corn Seeds: Physiological Quality and Field Performance. **OZONE-SCIENCE & ENGINEERING**, v. 43, p. 436-450, 2021

NG, C. A.; POŠTULKOVÁ, M.; MATOULKOVÁ, D.; PSOTA, V.; HARTMAN, I.; BRANYIK, T. Methods for suppressing Fusarium infection during malting and their effect on malt quality. **Czech Journal of Food Sciences**, v.39, n.5, p.340-359. 2021.

OBADI, M.; ZHU, K. X.; PENG, W.; SULIEMAN, A. A.; MAHDI, A. A.; MOHAMMED, K.; ZHOU, H. M. Shelf life characteristics of bread produced from ozonated wheat flour. **Journal of Texture Studies**, v. 49, n. 5, p. 492-502, 2018.

OWOLADE, O. F.; OLASOJI, J. O.; AFOLABI, C. G. Effect of storage temperature and packaging materials on seed germination and seed-borne fungi of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) in South West Nigeria. **African Journal of Plant Science**, v. 5, n. 15, p. 873-877, 2011.

PANDISELVAM, R.; MANIKANTAN, M. R.; DIVYA, V.; ASHOKKUMAR, C.; KAVYA, R.; KOTHKOTA, A.; RAMESH, S. V. Ozone: An advanced oxidation technology for starch modification. **Ozone: Science & Engineering**, v. 41, n. 6, p. 491-507, 2019.

PANDISELVAM, R.; MANIKANTAN, M. R.; DIVYA, V.; ASHOKKUMAR, C.; KAAVYA, R.; KOTHAKOTA, A.; RAMESH, S. V. Ozone: An advanced oxidation technology for starch modification. **Ozone: Science & Engineering**, v. 41, n. 6, p. 491-507, 2019.

PANDISELVAM, R.; THIRUPATHI, V. Reaction kinetics of ozone gas in green gram (*Vigna radiate*). **Ozone: Science & Engineering**, v. 37, n. 4, p. 309-315, 2015.

PANDISELVAM, R.; THIRUPATHI, V.; CHANDRASEKAR, V.; KOTHAKOTA, A.; ANANDAKUMAR, S. Numerical simulation and validation of mass transfer process of ozone gas in rice grain bulks. **Ozone: Science & Engineering**, v. 40, n. 3, p. 191-197, 2018.

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.

PASCARI, X.; MARÍN, S.; RAMOS, A. J.; MOLINO, F.; SANCHIS, V. Deoxynivalenol in cereal-based baby food production process. A review. **Food Control**, v. 99, p.11-20. 2019.

PASCUAL, A.; LLORCA, I.; CANUT, A. Use of ozone in food industries for reducing the environmental impact of cleaning and disinfection activities. **Trends in food science & technology**, v. 18, p. S29-S35, 2007.

PERINCHERRY, L.; LALAK-KAŃCZUGOWSKA, J.; STĘPIEŃ, Ł. Fusarium-Produced Mycotoxins in Plant-Pathogen Interactions. **Toxins**, v. 11, n. 664, 2019.

PIELECH-PRZYBYLSKA, K.; BALCEREK, M.; NOWAK, A.; WOJTCZAK, M.; CZYŻOWSKA, A.; DZIEKOŃSKA-KUBCZAK, U.; PATELSKI, P. The effect of different starch liberation and saccharification methods on the microbial contaminations of distillery mashes, fermentation efficiency, and spirits quality. **Molecules**, v. 22, n. 10, p. 1647, 2017.

PITT, J. I.; HOCKING, A. D. **Fungi and food spoilage**. New York: Springer, 2009.

PRONYK, C.; MAZZA, G. Fractionation of triticale, wheat, barley, oats, canola, and mustard straws for the production of carbohydrates and lignins. **Bioresource Technology**, v. 106, p. 117-124, 2012.

QI, J. C.; ZHANG, G. P.; ZHOU, M. X. Protein and hordein content in barley seeds as affected by nitrogen level and their relationship to beta-amylase activity. **Journal of Cereal Science**, v. 43, p. 102-107, 2006.

RANI, H.; BHARDWAJ, R. D. Quality attributes for barley malt: "The backbone of beer". **Journal of Food Science**, v. 86, n. 8, p. 3322-3340, 2021.

RIBEIRO, D. F.; FARONI, L. R. D. A.; PIMENTEL, M. A. G.; PRATES, L. H. F.; HELENO, F. F.; DE ALENCAR, E. R. Ozone as a fungicidal and detoxifying agent to maize contaminated with fumonisins. **Ozone: Science & Engineering**, v. 44, 2022.

ROSA, C. C.; DE ALENCAR, E. R.; SOUZA, N. O. S.; BASTOS, C. S.; SUINAGA, F. A.; FERREIRA, W. F. D. S. Physiological quality of corn seeds treated with gaseous ozone. **Ozone: Science & Engineering**, v.44, n.1, p.117-126. (2022).

SALEEM, A. M.; NYACHIRO, J.; GOMAA, W. M. S.; YANG, W.; OATWAY, L.; McALLISTER, T. A. Effects of barley type and processing method on rumen fermentation, dry matter disappearance and fermentation characteristics in batch cultures. *Animal Feed Science and Technology*, v. 269, p. 114625, 2020.

- SANCHEZ, D. R.; JESPERSEN, B. M.; RASMUSSEN, L. H.; ANDERSEN, M. L. Fungicidal effect of gaseous ozone in malting barley: implications for Fusarium infections and grain germination. **Journal of Cereal Science**, 103973, 2024.
- SANTOS, R. R.; FARONI, L. R.; CECON, P. R.; FERREIRA, A. P.; PEREIRA, O. L. Ozone as fungicide in rice grains. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 230-235, 2016.
- SCHWARZ, P. B.; CASPER, H. H.; BEATTIE, S. Fate and development of naturally occurring Fusarium mycotoxins during malting and brewing. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 53, p. 121–127, 1995.
- SCHWARZ, P. Fusarium head blight and deoxynivalenol in malting and brewing: Successes and future challenges. **Tropical Plant Pathology**, v. 42, p. 153–164, 2017.
- SEHIM, A. E.; ABD ELGHAFAR, R. Y.; EMAM, A. M.; EL-DESOUKY, T. A. Evaluation of the efficacy of ozonated olive oil for controlling the growth of *Alternaria alternata* and its toxins. **Heliyon**, v. 9, n. 7, 2023.
- SELIM, M.E.; EL-GAMMAL, N.A. Role of fusaric acid mycotoxin in pathogenesis process of tomato wilt disease caused by *Fusarium oxysporum*. **J. Bioprocess Biotech.**, v. 5, n. 1, 2015.
- SHOKRIBOUSJEIN, Z.; DECKERS, S. M.; GEBRUERS, K.; LORGOUILLOUX, Y.; BAGGERMAN, G.; VERACHTERT, H.; DELCOUR, A. J.; ETIENNE, P.; MARIE ROCK, J.; MICHIELS, C.; DERDELINCKX, G. Hydrophobins, beer foaming and gushing. **Cerevisia**, v.35, n.4, p.85-101. 2011.
- SILVA, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2ª. ed. Viçosa: UFV, 2008.
- SILVA, M. V. A.; MARTINS, M. A.; FARONI, L. R. D. A.; VANEGAS, J. D. B.; DE SOUSA, A. H. CFD modelling of diffusive-reactive transport of ozone gas in rice grains. **Biosystems Engineering**, v. 179, p. 49-58, 2019.
- 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.
- SILVA, M. V. D. A.; FARONI, L. R. D. A.; DE ALENCAR, E. R.; DE SOUSA, A. H.; CECON, P. R.; NOGUEIRA, J. V. F.; MASON FILHO, V. Ozone injection at low pressure: decomposition kinetics, control of *Sitophilus zeamais*, and popcorn kernel quality. **Ozone: Science & Engineering**, v. 44, p. 66-78, 2021.
- SINGH, A.; SINGH, S.; KANSAL, S. K.; GARG, M.; KRISHANIA, M. Production and characterization of anthocyanin-rich beer from black wheat by an efficient isolate *Saccharomyces cerevisiae* CMS12. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 5863, 2023.
- SINGH, V.K.; UPADHYAY, R.S. Fusaric acid induced cell death and changes in oxidative metabolism of *Solanum lycopersicum* L. **Bot. Stud.**, v. 55, n. 66, 2014.
- SITOE, E. D. P. E.; DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. A.; FONTES, E. A. F.; DE ASSIS SILVA, M. V.; MACHADO, F. J.; PANDISELVAM, R.; MAGALHÃES, C. G. Application of ozone at low-pressure: control of egg and larval phases of *Zabrotes subfasciatus*, inactivation of *Aspergillus flavus* and qualitative changes in bean grains. **Food Control**, v. 158, p. 110238, 2024.

SITOE, E. D. P. E.; FARONI, L. R. D. A.; DE ALENCAR, E. R.; SILVA, M. V. D. A.; SALVADOR, D. V. 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.

SIVARANJANI, S.; PRASATH, V. A.; PANDISELVAM, R.; KOTHAKOTA, A.; KHANEGHAH, A. M. Avanços recentes em aplicações de ozônio na indústria de cereais. **LWT**, v. 146, p. 111412, 2021.

SMITH, G.W. **Fumonisin**. In: GUPTA, R. (Ed.). *Veterinary Toxicology*. 3rd ed. New York: Elsevier, 2018. p. 1003-1018.

SOUZA, J. V. D. S.; ALENCAR, E. R.D.; JUNQUEIRA, A. M. R.; OLIVEIRA, G. P. Ozone saturation and decomposition kinetics in porous medium containing different hybrids of maize. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 286-291, 2018.

SOUZA, R.; GRZYBOWSKI, C.; CASTRO OHLSON, O.; CARVALHO DA SILVA, R.; PANOBIANCO, M. Viability of barley seeds by the tetrazolium test. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, p. 47-54, 2012.

STAEHELIN, J.; BUEHLER, R. E.; HOIGNE, J. Ozone decomposition in water studied by pulse radiolysis. 2. Hydroxyl and hydrogen tetroxide (HO₄) as chain intermediates. **Chemischer Informationsdienst**, v. 16, 1985.

STĘPIEŃ, Ł.; KOCZYK, G.; WAŚKIEWICZ, A. FUM cluster divergence in fumonisins-producing *Fusarium* species. **Fungal Biol.**, v. 115, p. 112-123, 2011.

TIMM, N. H. **Applied multivariate analysis**. New York: Springer-Verlag, 2002. 519 p.

TIWARI, N.; AHMED, S.; KUMAR, S.; SARKER, A. **Murcha de fusarium: Uma doença mortal da lentilha**. In: ASKU, T. (Ed.). *Doenças de plantas de fusarium, diversidade de patógenos, diversidade genética, resistência e marcadores moleculares*. Rijeka: IntechOpen, 2018.

TRAKSELYTE-RUPSIENE, K.; JUODEIKIENE, G.; HAJNAL, E. J.; BARTKEVICS, V.; PUGAJEVA, I.; KLUPSAITE, D.; BARTKIENE, E. Challenges of *Lactobacillus* fermentation in combination with acoustic screening for deoxynivalenol and deoxynivalenol conjugates reduction in contaminated wheat-based products. **Food Control**, v. 134, p. 108699, 2022.

TUNES, L. M.; BANDINELLI, P. G.; OLIVO, F.; BARROS, A. C. S. A. Tratamento para superação da dormência em sementes de cevada. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 1, p. 015-021, 2009.

ULLRICH, S. E. **Significance, adaptation, production, and trade of barley**. In: ULLRICH, S. E. (ed.). *Barley: production, improvement and uses*. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010. p. 3-13.

USDA. Retrieved on December 30, 2022, from <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0430000>.

UZOMA, S.; DE ALENCAR, E. R.; FARONI, L. R. D. A.; DE ASSIS SILVA, M. V.; SITOE, E. D. P. E.; PANDISELVAM, R.; MACHADO, S. G. Association between low-

temperature drying and ozonation processes to control pests and preserve maize quality. **Food Control**, v. 156, p. 110119, 2024.

VAN NIEROP, S. N. E.; RAUTENBACH, M.; AXCELL, B. C.; CANTRELL, I. C. The impact of microorganisms on barley and malt quality—a review. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v.64, n.2, p.69-78. 2006.

VERMA, R. P. S.; LAL, C.; MALIK, R.; KHARUB, A. S.; KUMAR, L.; KUMAR, D. Barley improvement: current status and future prospects in changing scenario. *New Horizons in Wheat and Barley Research: Global Trends, Breeding and Quality Enhancement*, p. 93-134, 2022.

VIANELLO, A.; MACRI, F. Inhibition of plant cell membrane transport phenomena induced by zearalenone (F-2). **Planta**, v. 143, p. 51-57, 1978.

VIEIRA, R. D.; TEKRONY, D. M.; EGLI, D. B.; RUCKER, M. Electrical conductivity of soybean seeds after storage in several environments. **Seed Science and Technology**, p. 599-608, 2001.

VILCHEZ, A. C.; VILLASUSO, A. L.; WILKE, N. Biophysical properties of lipid membranes from barley roots during low-temperature exposure and recovery. **Langmuir**, v. 39, n. 33, p. 11664-11674, 2023.

VIOLLEAU, F.; HADJEBA, K.; ALBET, J.; CAZALIS, R.; SUREL, O. Effect of oxidative treatment on corn seed germination kinetics. **Ozone: Science and Engineering**, v. 30, n. 6, p. 418-422, 2008.

WAWRZYNIAK, M. K.; KALEMBA, E. M.; RATAJCZAK, E.; CHMIELARZ, P. Oxidation processes related to seed storage and seedling growth of *Malus sylvestris*, *Prunus avium* and *Prunus padus*. **PLoS One**, v. 15, n. 6, e0234510, 2020.

WHITE, S. D.; MURPHY, P. T.; BERN, C. J.; VAN LEEUWEN, J. H. Controlando a deterioraç o do milho de alta umidade com tratamento com ozônio. **Journal of Stored Products Research**, v. 46, n. 1, p. 7-12, 2010.

WIEBE, L.A.; BJELDANES, L.F. Fusarin C, a mutagen from *Fusarium moniliforme* grown on corn. **J. Food Sci.**, v. 46, p. 1424-1426, 1981.

WOLF-HALL, C. E. Mold and mycotoxin problems encountered during malting and brewing. **International Journal of Food Microbiology**, v. 119, p. 89–94, 2007.

WOLF-HALL, C. E.; SCHWARZ, P. B. Mycotoxins and fermentation-beer production. **Advances in Experimental Medicine and Biology**, v. 504, p. 217-226, 2002.

Wrigley, C. W.; Corke, H.; Seetharaman, K.; Faubion, J. (Ed.). **Encyclopedia of food grains**. Academic Press, 2015.

WU, J.; DOAN, H.; CUENCA, M. A. Investigation of gaseous ozone as an anti-fungal fumigant for stored wheat. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental & Clean Technology**, v. 81, n. 7, p. 1288-1293, 2006.

ZHOU, M. X. World barley production. In: *Genetics and Improvement of Barley Malting Quality*. Heidelberg: **Springer**, p. 1-15, 2008.

ZHU, F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. **Food Chemistry**, v. 264, p. 358-366, 2018.

ZULUAGA-CALDERÓN, B.; GONZÁLEZ, H. H. L.; ALZAMORA, S. M.; CORONEL, M. B. Tratamentos com ozônio em várias etapas da cevada para malte: efeito na incidência de *Fusarium graminearum* e parâmetros de germinação de grãos. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 83, p. 103219, 2023.