



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE

**QUALIDADE SANITÁRIA E FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE ESPÉCIES
FLORESTAIS DA CAATINGA EXPOSTAS AO GÁS OZÔNIO**

GEORGIA MILENA ALVES TAVARES

Mossoró/RN
Maio de 2025

JEORGIA MILENA ALVES TAVARES

**QUALIDADE SANITÁRIA E FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE ESPÉCIES
FLORESTAIS DA CAATINGA EXPOSTAS AO GÁS OZÔNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus de Mossoró, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Orientadora: Dra. Elis Regina Costa de Moraes

Coorientadores: Dra. Ane Cristine Fortes da Silva

Dr. Salvador Barros Torres

Mossoró/RN

Maio de 2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

T231q Tavares, Jeorgia Milena Alves.
Qualidade sanitária e fisiológica de sementes
de espécies florestais da caatinga expostas ao
gás ozônio / Jeorgia Milena Alves Tavares. – 2025.
57 f. : il.

Orientadora: Elis Regina Costa de Moraes.
Coorientadora: Ane Cristine Fortes da Silva.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2025.

1. germinação. 2. ozonização de sementes. 3.
incidência fúngica. I. Moraes, Elis Regina Costa
de, orient. II. Silva, Ane Cristine Fortes da, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

JEORGIA MILENA ALVES TAVARES

**QUALIDADE SANITÁRIO E FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE ESPÉCIES
FLORESTAIS DA CAATINGA EXPOSTAS AO GÁS OZÔNIO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Campus de Mossoró, como parte das exigências para obtenção de título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Aprovado em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr^a. Elis Regina Costa de Moraes – UFERSA
Presidente/Orientadora

Prof. Dr. Márcio Dias Pereira – UFRN
Examinador externo

Profa. Dr^a. Charline Zaratini Alves – UFMS
Examinadora Externa

Profa. Dr^a. Ane Cristine Fortes da Silva – UFERSA
Coorientadora

Prof. Dr. Salvador Barros Torres – EMPARN/UFERSA
Coorientador

“In memoriam de João Batista de Figueirêdo Cabral”.

“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas”

Antoine de Saint-Exupéry

AGRADECIMENTOS

A Deus e ao meu São Bento pela força espiritual de nunca desistir.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Campus Mossoró, agradeço a oportunidade e pelas condições oferecidas durante a realização do curso.

Agradeço à orientadora, Professora Dra. Elis Regina Costa de Moraes, ao meu coorientador, Professor Dr. Salvador Barros Torres, pelos ensinamentos inestimáveis, pela PACIÊNCIA, pelos cuidados e disponibilidade que foram imprescindíveis na construção deste trabalho.

À professora Dra. Ane Fortes, por ser esse ser humano tão generoso e inspirador: muito obrigada por ser não apenas minha coorientadora, mas também uma verdadeira mãe e amiga em todos os momentos desta jornada. Eu e Esterzinha te amamos!

Aos professores que integram o corpo docente do Programa (PPGATS), minha profunda gratidão. Em especial, ao professor Ricardo Leite, pelo carinho e gentileza de sempre; professor Marlon, vulgo Mocinho, a quem expressei meu muito obrigada por conseguir extrair o melhor de nós enquanto alunos; à professora Ana Beatriz Passos, pelas conversas no final das aulas e pelos abraços cheios de ternura; é a professora Paula, por ministrar suas aulas com tanto amor pelo que faz.

À Professora Dra. Lidiane, do curso de Biotecnologia, meu profundo agradecimento pelo empréstimo dos materiais solicitados durante a condução do experimento. A senhora é uma querida.

Aos técnicos dos Laboratórios, Lidiane, Marcelo e Sara, muito obrigada pela disponibilidade, paciência e cuidados de sempre. Agradeço também por compartilharem seu saber durante a condução do experimento.

À minha família, por estarem ao meu lado em todos os momentos desta jornada e das que virão. Vocês são a minha força e um dos meus maiores alicerces.

Ao meu marido e coorientador não oficial Lívio Carvalho de Figueirêdo, agradeço profundamente pela paciência, compreensão e pelo apoio emocional constante. Sua ajuda foi essencial para que eu superasse os desafios, principalmente nos momentos em que pensei em fraquejar. Obrigada!

À minha pequena, amada e querida filha, Ester Tavares de Figueirêdo: não há amor maior no mundo do que o que sinto por você, minha filha. Sua presença foi o meu maior presente e a minha maior inspiração durante o mestrado. Obrigada por trazer luz e sentido à minha jornada.

Às minhas companheiras de bancada, Ludmila, Tamires, Vitória Thanyse, Yara, Ruth, Sandy, Elaine, Ingrid, Juliana, Mônica, Lia, Karinny e Lucas, meu muito obrigada pela cumplicidade, pelo apoio constante, pelas risadas compartilhadas e por serem o meu ombro amigo. Sem a ajuda e dedicação de vocês, algumas etapas deste trabalho não teriam sido possíveis. Agradeço imensamente a vocês, meus queridos “Labfingers”, por tornarem essa jornada mais leve, especial e repleta de memórias inesquecíveis.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio por meio do Programa Emergencial de Consolidação Estratégica dos Programas de Pós-Graduação Stricto Sensu Acadêmicos, conforme a Portaria nº 155, de 10 de agosto de 2022 (Processo 88881.707733/2022-01).

Agradeço de coração a todos que fizeram parte dessa jornada!

RESUMO

As sementes representam o principal meio de propagação de espécies nativas, sendo fundamentais para a produção de mudas de diversas espécies florestais. No entanto, de modo geral, a sua germinação pode ser reduzida por fatores abióticos, como temperatura e umidade inadequadas, e por fatores bióticos, como a presença de fungos patogênicos. Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos de diferentes tempos de exposição ao gás ozônio em sementes de *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., *Piptadenia retusa* (Jacq.) P.G. Ribeiro, Seigler & Ebinger e *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. A coleta das sementes ocorreu no Parque Nacional Fuma Feia, cujos frutos foram acondicionados em sacos plásticos e levados ao Laboratório de Conservação Florestal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), onde foi realizado o beneficiamento das sementes. Foram avaliados cinco tratamentos: TC (tratamento controle), tratamentos T15, T30, T45 e T60 que corresponderam aos tempos de exposição ao ozônio, 15, 30, 45 e 60 minutos, respectivamente. O fluxo de ozônio foi de 2,0 g h⁻¹, resultando nas doses de 0,5 g, 1,0 g, 1,5 g e 2,0 g, respectivamente. Foram avaliados as variáveis de germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), tempo médio de germinação (TMG), comprimento da parte aérea, comprimento do sistema radicular, massa seca da parte aérea, massa seca do sistema radicular e incidência de fungos. A interação dos fatores tempo e espécie foi significativa para as variáveis TMG, IVG e PG, indicando que as espécies possuem comportamento distinto em relação ao período de exposição ao ozônio. Já para a incidência de fungos, a interação não foi significativa, o que sugere que o ozônio atua de forma homogênea no controle fúngico, independentemente da espécie. *P. retusa* teve alta sensibilidade ao ozônio, evidenciada pela redução expressiva no índice de velocidade de germinação, aumento significativo do tempo médio de germinação e diminuição da massa seca de raiz. Em contraste, *M. tenuiflora* e *M. caesalpiniiifolia* mostraram maior tolerância ao tratamento com ozônio, mantendo padrões estáveis de germinação e de desenvolvimento inicial. A porcentagem de fungos foi reduzida significativamente com o aumento do tempo de exposição das sementes ao ozônio para as espécies analisadas em folhas de papel toalha. Já na análise de incidência de fungos na incubação em placas de Petri, os resultados confirmam a eficiência do ozônio como agente sanitizante em sementes florestais, com potencial de controle fúngico principalmente para *Mimosa tenuiflora*. No entanto, os efeitos foram espécie-dependentes, evidenciando a importância de considerar variáveis fisiológicas e microbiológicas na formulação de protocolos de tratamento. Conclui-se que a utilização do ozônio como agente sanitizante em sementes florestais pode ser uma alternativa sustentável e com elevado potencial no controle de patógenos. Entretanto, os efeitos fisiológicos e sanitários do tratamento não se manifestaram de forma uniforme entre as espécies avaliadas, evidenciando variações na sensibilidade fisiológica e na composição microbiológica específica de cada uma.

Palavras-chave: germinação; ozonização de sementes; incidência fúngica.

ABSTRACT

The seeds represent the main means of propagation for native species and are essential for the production of seedlings of various forest species. However, in general, their germination can be reduced by abiotic factors, such as inadequate temperature and humidity, and by biotic factors, such as the presence of pathogenic fungi. In this context, the objective of this study was to evaluate the effects of different exposure times to ozone gas on seeds of *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir., *Piptadenia retusa* (Jacq.) P.G. Ribeiro, Seigler & Ebinger, and *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. The seeds were collected in the Furna Feia National Park, with the fruits stored in plastic bags and taken to the Forest Conservation Laboratory of the Federal Rural University of the Semi-Arid (UFERSA), where seed processing was conducted. Five treatments were evaluated: TC (control treatment), and treatments T15, T30, T45, and T60, corresponding to ozone exposure times of 15, 30, 45, and 60 minutes, respectively. The ozone flow rate was 2.0 g h^{-1} , resulting in doses of 0.5 g, 1.0 g, 1.5 g, and 2.0 g, respectively. The evaluated variables included germination percentage, germination speed index (GSI), mean germination time (MGT), shoot length, root system length, shoot dry mass, root dry mass, and fungal incidence. A significant interaction between exposure time and species was observed for MGT, GSI, and germination percentage, indicating distinct responses among species to ozone exposure periods. For fungal incidence, however, the interaction was not significant, suggesting that ozone acts uniformly in fungal control regardless of the species. *P. retusa* showed high sensitivity to ozone, evidenced by a marked reduction in germination speed index, a significant increase in mean germination time, and a decrease in root dry mass. In contrast, *M. tenuiflora* and *M. caesalpiniiifolia* showed greater tolerance to ozone treatment, maintaining stable germination and early development patterns. Fungal incidence decreased significantly with increasing ozone exposure time for all species analyzed on paper towel substrates. In Petri dish incubation assays, results confirmed the effectiveness of ozone as a sanitizing agent for forest seeds, with notable fungal control potential, particularly for *Mimosa tenuiflora*. Nevertheless, the effects were species-dependent, highlighting the importance of considering physiological and microbiological variables in treatment protocol development. It can be concluded that the use of ozone as a sanitizing agent for forest seeds represents a sustainable and highly promising alternative for pathogen control. However, the physiological and sanitary effects of the treatment varied among species, revealing differences in physiological sensitivity and species-specific microbiological composition.

Keywords: germination; seed ozonation; fungal incidence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização do Parque Nacional Fuma Feia, Baraúna e Mossoró-RN.....	24
Figura 2 - Localização dos indivíduos matrizes no Parque Nacional Fuma Feia, Baraúna e Mossoró-RN.....	24
Figura 3 - Marcação das árvores matrizes e coletas dos frutos no Parque Nacional Fuma Feia, Baraúna e Mossoró, RN.....	25
Figura 4 - Sistema de exposição das sementes ao ozônio.....	26
Figura 5 - Disposição das sementes inoculadas em câmara úmida.....	26
Figura 6 - Esquema do processo de identificação de fungos.....	26
Figura 7 - Preparação e acondicionamento das sementes.....	32
Figura 8 - Índice de velocidade de germinação (IVG), tempo médio de germinação (TMG), velocidade média de germinação (VMG) e porcentagem de germinação (PG) em função do tempo de exposição e concentração do ozônio das sementes das espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	36
Figura 9 - Média e desvio padrão da massa da parte aérea (mm) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies avaliadas.....	37
Figura 10 - Média e desvio padrão do comprimento de raiz (mm) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	38
Figura 11 - Média e desvio padrão da massa da parte aérea e raiz (mm) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	39
Figura 12 - Incidência de fungos (%) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	42
Figura 13 - Predições ajustadas da incidência de fungos (%) ao longo de 14 dias, em sementes de <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> , submetidas a diferentes tempos de exposição e concentração de ozônio.....	43
Figura 14 - Incidência de fungos (%) no teste de sanitização em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características físico-químicas da molécula de ozônio (O ₃) e do oxigênio (O ₂).....	20
Tabela 2 - Resultado dos testes de homogeneidade de variância (Levene) e de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) para as variáveis tempo médio de germinação (TMG), índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de germinação (PG) e porcentagem de fungos (PF).....	29
Tabela 3 - Análise de deviance (ANOVA - GLM) com efeitos principais e de interação para as tempo médio de germinação (TMG), índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de germinação (PG) e porcentagem de fungos (PF), considerando os fatores espécie, tempo de exposição e concentração do ozônio.....	30
Tabela 4 - Média e desvio padrão da velocidade média de germinação (VMG) em relação ao tempo de exposição e concentração do ozônio para as espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> e valores do p dos contrastes ortogonais.....	34
Tabela 5 - Média e desvio padrão do tempo médio de germinação (TMG) em relação ao tempo de exposição e contração de ozônio para as espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> e valores do p dos contrastes ortogonais.....	34
Tabela 6 - Média e desvio padrão do índice de velocidade de germinação (IVG) em relação ao tempo de exposição ao ozônio para as espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> e valores do p dos contrastes ortogonais.....	35
Tabela 7 - Média e desvio padrão da porcentagem de germinação (PG) em relação ao tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies <i>Piptadenia retusa</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> e valores do p dos contrastes ortogonais.....	35
Tabela 8 - Equações logísticas ajustadas para a estimativa da incidência de fungos (%) ao longo do tempo (em dias) em sementes de <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Piptadenia retusa</i> , submetidas a diferentes tempos de exposição e concentrações de ozônio. 41	
Tabela 9 - Estatística descritiva da incidência de fungos (%) no teste de sanidade em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Piptadenia retusa</i>	42
Tabela 10 - Gêneros de fungos incidentes nas sementes das espécies <i>Mimosa caesalpiniiifolia</i> , <i>Mimosa tenuiflora</i> e <i>Piptadenia retusa</i> em função dos tempos de exposição e concentração do ozônio.....	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1 Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS).....	14
2.1.1 Caracterização.....	14
2.1.2 Família Fabaceae – Leguminosae.....	15
2.1.3 Espécies florestais em estudo.....	16
2.2 Ozônio na sanitização de sementes.....	19
2.1.1 Características e propriedades do ozônio.....	19
2.1.2 Histórico de uso.....	20
2.1.3 Aplicações do ozônio.....	21
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	23
3.1 Área de Estudo.....	23
3.2 Teste de sanitização das sementes.....	25
3.3 Teste de germinação.....	27
3.4 Variáveis analisadas.....	27
3.5 Análise estatística.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1 Pressupostos e análises iniciais para o teste de germinação.....	29
4.2 Efeito do tempo de exposição ao ozônio na germinação de sementes.....	31
4.3 Efeito do tempo de exposição ao ozônio na contaminação fúngica.....	39
4.3.1 Análise da incidência de fungos: Papel Germitest®.....	39
4.3.2 Teste de sanidade de sementes em placas.....	41
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Apesar de ser considerada um dos ecossistemas mais representativos do semiárido brasileiro, a vegetação da Caatinga enfrenta intenso processo de degradação ambiental, com sérias implicações para sua biodiversidade e funcionalidade ecológica (Araújo *et al.*, 2023). Esse cenário reforça a urgência de ações voltadas à restauração de áreas degradadas e conservação de recursos naturais (Mariano *et al.*, 2022), fundamentais para assegurar tanto a preservação dos ecossistemas quanto a promoção da sustentabilidade das comunidades locais (Castillo *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a disponibilidade de sementes de qualidade constitui componente estratégico, possibilitando o enfrentamento aos desafios ambientais e aumentando as chances de sucesso utilizadas em programas em reflorestamento, recuperação de áreas degradadas, arborização urbana e a preservação das espécies (Guimarães *et al.*, 2024). Portanto, garantir a obtenção de sementes livres de fitopatógenos é uma estratégia indispensável para assegurar o sucesso do plantio ou semeadura, especialmente em iniciativas voltadas para recuperação das áreas degradadas (Frischie *et al.*, 2020).

A utilização de sementes isentas ou com baixa incidência de fitopatógenos pode contribuir significativamente para a restauração funcional desses ecossistemas. Esse manejo adequado promove a regeneração da biodiversidade, ao minimizar os danos causados por doenças de origem fúngica, bacteriana ou viral e atua na mitigação dos impactos ambientais associados à degradação dos habitats naturais (Dell'olmo *et al.*, 2023).

Estudos destacam os efeitos positivos do gás ozônio (O_3) frente às técnicas tradicionais na preservação de alimentos (Savi *et al.*, 2020; Siteo *et al.*, 2024). O ozônio tem sido reconhecido como um potente agente oxidante que demonstrou ser eficaz contra diversos tipos de microrganismos que causam deterioração e/ou contaminação em frutas, vegetais, grãos e seus derivados (Pandiselvam *et al.*, 2020; Bernate *et al.*, 2024; Lemic *et al.*, 2024). Além disso, o ozônio pode inativar fungos e aumentar a resistência das culturas a doenças específicas, contribuindo para a redução do uso de defensivos químicos e fungicidas (Matlok *et al.*, 2024; Uzama *et al.*, 2024).

O ozônio tem como mecanismo de ação baseada na geração de espécies reativas de oxigênio (ERO), que causam danos irreversíveis às membranas celulares, enzimas e estruturas genéticas dos microrganismos (Epelle *et al.*, 2023), impedindo sua propagação e contaminação das plantas em desenvolvimento. A literatura científica tem destacado sua eficácia no tratamento de sementes agrícolas, tanto no controle de patógenos quanto na

promoção da qualidade sanitária das sementes (Savi *et al.*, 2020; Pandiselvam *et al.*, 2020; Sitee *et al.*, 2024).

Ao avaliarem a esterilização de sementes de arroz com ozônio, Kang *et al.* (2015) constataram que houve inativação do *Fusarium fujikuroi* com eficácia variando conforme a concentração e tempo de exposição. De forma semelhante, Çetinkaya, Pazarlar e Paylan (2022) demonstraram que o tratamento com ozônio mostrou-se eficaz na inativação de fungos e bactérias comuns em sementes de tomate e pepino, sem comprometer a qualidade germinativa das sementes tratadas.

Apesar desses avanços, o uso do ozônio em sementes florestais ainda é pouco explorado, especialmente para espécies nativas da Caatinga. Considerando a importância ecológica e econômica deste ecossistema, e a necessidade urgente de tecnologias sustentáveis para a produção de mudas de qualidade (Noutcheu *et al.*, 2023; Araújo *et al.*, 2023), este estudo objetivou avaliar o desempenho sanitário e fisiológico de sementes de espécies florestais da Caatinga expostas ao gás ozônio.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS)

2.1.1 Caracterização

A vegetação típica da Caatinga faz parte de um ecossistema global mais amplo denominado Florestas e Arbustos Tropicais Sazonalmente Secos (FATSS) (Fernandes *et al.*, 2018). No Brasil, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012), às Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) são classificadas como Florestas Estacionais Deciduais (FED).

A precipitação anual média nessas áreas varia de 250 a 2.000 mm, com acentuada sazonalidade, concentrando-se em uma única estação de três a cinco meses, marcada pela insuficiência e irregularidade tanto temporal quanto espacial (Souza Filho, 2011; Bezerra, 2002). A estacionalidade da precipitação exerce influência dominante nessas formações, como afirmado por Murphy e Lugo (1986). Os padrões temporais de atividade biológica, como crescimento e reprodução, estão sincronizados com a disponibilidade de água. Esses autores também destacam que o déficit hídrico pode variar de ano para ano e que essa variação pode ter impacto maior na estrutura, composição e ecologia da vegetação do que as médias anuais de precipitação.

O principal fator limitante do desenvolvimento no semiárido brasileiro é a água; não propriamente pelo volume precipitado, mas pela quantidade evaporada (Bezerra *et al.*, 2002). Enquanto a temperatura, a radiação solar e os aportes de nutrientes nos ecossistemas do semiárido variam relativamente pouco no ano. A precipitação pluviométrica comumente ocorre em eventos descontínuos em forma de pulsos de curta duração (Noy-Meir, 1973). As variações climáticas, sobretudo nos períodos de estiagem, agravam um conjunto de questões econômicas e sociais, que desestruturam os sistemas produtivos (Bezerra *et al.*, 2002).

As FTSS no Brasil ocorrem principalmente em áreas de afloramento rochoso e solo eutrófico e apresentam vegetação composta predominantemente por espécies de baixo a médio porte, como arvoretas e arbustos (Oliveira-Filho *et al.*, 2006). Muitas dessas espécies possuem características adaptadas às condições do ambiente semiárido, demonstrando ampla variedade de estratégias para assegurar sua sobrevivência (Fernandes; Queiroz 2018). Essas formações florestais distinguem-se por apresentarem elevado grau de caducifolia, ou seja, a perda da folhagem da maioria dos indivíduos durante o período de estiagem, como estratégia

para lidar com a baixa disponibilidade hídrica (Pio *et al.*, 2023). Entre essas estratégias, destacam-se a capacidade de reter água nos tecidos, a queda de folhas para minimizar a perda de umidade durante os períodos de seca e ciclos de floração ajustados aos períodos chuvosos (Ricardo *et al.*, 2018).

Além disso, adaptações fisiológicas refletem-se na produção de metabólitos e proteínas especializadas, conferindo a essas plantas uma maior resiliência diante das adversidades ambientais. Apesar de sua alta diversidade, atualmente apenas metade da cobertura florestal original está preservada, sendo que a maior parte permanece desprotegida por legislação específica (Antongiovanni *et al.*, 2018).

2.1.2 Família Fabaceae – Leguminosae

A família Fabaceae, também denominada Leguminosa, trata-se de uma espécie das famílias mais numerosas do reino vegetal, com ampla distribuição Pantropical, especialmente em regiões de clima tropical e subtropical, sendo comum em amplamente florestas tropicais sazonalmente secas (Lewis *et al.*, 2005; LPWG, 2017).

No Brasil, a família está representada por aproximadamente 2.827 espécies, distribuídas em 222 gêneros, dos quais 1.524 espécies e 16 gêneros são endêmicos, ou seja, exclusivos do território nacional (BFG, 2015). Em sua maioria, as espécies dessa família apresentam como característica marcante de frutos tipo legume (vagem). Quanto ao hábito de crescimento, podem ser classificadas como plantas arbóreas perenes ou espécies herbáceas anuais, com algumas variações dependendo do gênero e das condições ecológicas (Carvalho; Gaiad, 2022).

Algumas espécies da família Fabaceae são conhecidas por serem ricas em diferentes metabólitos secundários, destacando-se, entre eles, as antraquinonas (Borges; Azevedo, 2017). Além de sua relevância fitoquímica, as leguminosas possuem expressiva significativa importância agrônômica, principalmente por sua capacidade de realizar a fixação nitrogênio biológica, realizada em associação com bactérias específicas, conhecidas como bactérias fixadoras de nitrogênio (Embrapa, 2022). Essa associação pode ocorrer de três formas distintas: associativa, endofítica e simbiótica, sendo esta última a mais comum nas espécies de maior interesse agrícola.

Muitas espécies de leguminosas fixadoras de nitrogênio presente na flora do Nordeste brasileiro destacam-se pelo seu valor econômico, sendo amplamente utilizados como forragem, lenha ou matéria-prima para a produção de produtos medicinais (Queiroz, 2009).

Em florestas tropicais sazonalmente secas, algumas sementes apresentam adaptações específicas que favorecem sua sobrevivência, permitindo que a germinação ocorra apenas quando as condições ambientais se tornam favoráveis para a sobrevivência da planta (Monteiro Júnior *et al.*, 2018). Dessa forma, a obtenção de mudas destinadas à arborização urbana, à recuperação de áreas degradadas, à reposição florestal e programas de reflorestamento tem conferido crescente relevância à produção de sementes de espécies florestais. Tal produção é essencial para preservação de espécies florestais nativas ameaçadas em extinção, além de atender a diversas outras que dependem diretamente desse insumo (Silva *et al.*, 2025).

2.1.3 Espécies florestais em estudo

Mimosa tenuiflora (Willd.) Poir.

Mimosa tenuiflora é também popularmente conhecida como jurema-preta, calumbi ou apenas jurema. Pertence à família Fabaceae (Alves *et al.*, 2005). Possui porte entre 5,0 e 7,0 metros de altura, com acúleos esparsos, caule ereto ou levemente inclinado, casca de cor castanha muito escura, às vezes acinzentada, grosseira, rugosa, fendida longitudinalmente e entrecasca vermelho-escura (Maia, 2004).

Possui folhas compostas, alternas, bipinadas, com 4,0 - 7,0 pares de pinas de 2,0 - 4,0 cm de comprimento. Suas flores são pequenas de cor clara, dispostas em espigas isoladas de 4,0 - 8,0 cm de comprimento. O fruto é uma vagem pequena, tardiamente deiscente, de 2,5 a 5,0 cm de comprimento, de casca muito fina e quebradiça quando maduro (Maia, 2004).

Essa espécie ocorre em praticamente toda região Nordeste do Brasil, nos estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia (Bezerra, 2011).

A jurema-preta tem um grande potencial como planta regeneradora de solos erodidos, além disso, no início da sucessão formam matas quase puras, seus folíolos caem e se refazem continuamente cobrindo o solo com uma tênue camada que se decompõe formando ligeiras camadas de húmus e participa também da recuperação do teor de nitrogênio do solo, preparando para o aparecimento de outras plantas mais exigentes como pau'darco, aroeira, cumaru, angico, juazeiro, mofumbo, dentre outras (Maia, 2004).

Apresenta alto potencial para o reflorestamento em áreas de solos tropicais degradados, tendo a semente como o principal meio de propagação, ressalta-se a necessidade de gerar

informações sobre a qualidade fisiológica, pois, são através dos testes de germinação e vigor, que pode caracterizar os seus atributos físicos e fisiológicos, uma vez que, nas espécies nativas, a variação na germinação é muito grande dentro de uma mesma população (Azevedo, 2012).

A espécie de *M. tenuiflora* apresenta relevante importância na área farmacêutica, especialmente pelas propriedades medicinais atribuídas à sua casca, a qual tem sido amplamente utilizada no tratamento de queimaduras e infecções (Santos *et al.* 2022). Além disso, estudos recentes indicam seu potencial efeito antidepressivo, reforçando o seu valor terapêutico (Alves *et al.*, 2005).

No contexto agropecuário, a *M. tenuiflora* também se destaca como uma importante fonte forrageira para alimentação de ruminantes no semiárido brasileiro. Pode ser ofertada, tanto na forma verde – especialmente durante a fase de rebrota no início das chuvas — quanto fenada, por meio de folhas e vagens secas colhidas durante o período de estiagem, contribuindo significativamente para a dieta de pequenos e grandes ruminantes (Voltolini *et al.*, 2010).

Diante de sua ampla distribuição no semiárido brasileiro e de relevância ecológica, socioeconômica e medicinal, *Mimosa tenuiflora* torna-se uma espécie-chave em estratégias de restauração florestal na Caatinga. No entanto, para que esse potencial seja atingido, faz-se necessário assegurar a qualidade das sementes utilizadas, especialmente no que diz respeito à sua sanidade e capacidade de germinação.

Assim, a busca por alternativas eficazes e ambientalmente seguras, como o tratamento com o gás ozônio, surge como uma estratégia promissora para a sanitização de espécies florestais. Estudos que contribuem para esse tema podem auxiliar na propagação de espécies nativas, ampliando as chances de sucesso em ações de recuperação.

Piptadenia retusa (Jacq.) P.G. Ribeiro, Seigler & Ebinger

Piptadenia retusa é também popularmente conhecida como carcará, jurema-branca, rasga-beiço e saia-velha. Pertence à família Fabaceae. É uma planta caducifólia possui porte de aproximadamente de 2 - 4 metros de altura, com casca castanho claro, fortemente armada por acúleos vigorosos. As folhas são do tipo alternas, compostas, com 10 - 16 pares de pinas opostas, cada pina com 2 - 5,5 cm de comprimento, verde-claro e fosco (Maia, 2004).

As flores são do tipo espiga de 4 - 8 cm de comprimento, de cor clara, na extremidade dos ramos onde se encontram até três espigas por axila de folha e sua floração ocorre na

estação chuvosa, mas pode também ser encontrada na estação seca, seguida pela frutificação que se estende até a estação seca (Maia, 2004).

Essa espécie ocorre em praticamente toda região Nordeste do Brasil, nos estados do Piauí até a Bahia (Bezerra, 2008). Sua propagação é feita por sementes, que podem ser colhidas no início da abertura espontânea dos frutos (Lorenzi, 2000).

A *P. retusa* é uma planta pioneira que facilmente ocupa capoeiras e beiras de estrada, é tolerante a elevados níveis de perturbação da vegetação e é uma árvore com capacidade de fixar nitrogênio no solo através de simbiose com bactérias na sua raiz (Queiroz, 2009).

A literatura relata que todas as partes de *P. retusa* apresentam propriedades biológicas relevantes, atribuídas principalmente à presença de metabólitos secundários, como taninos e flavonoides. Na medicina popular, essa espécie é tradicionalmente utilizada como agente cicatrizante, sedativo e anti-inflamatório (Bezerra *et al.*, 2011)

Além disso, devido à sua ampla gama de atividades biológicas, incluindo o potencial antioxidante, antimicrobiano e antitumoral, os metabólitos secundários obtidos de *P. retusa* vêm sendo estudados como possíveis fontes alternativas para o desenvolvimento de compostos biológicos ativos (Albuquerque; Andrade, 2002; Albuquerque, 2010; Andrade, 2022; Oliveira, 2023).

Considerando sua habilidade em colonizar áreas degradadas e ampla ocorrência na região, assim como o potencial farmacológico, fortalecer práticas conservacionistas e produtivas da *Piptadenia retusa* torna-se fundamental para o sucesso na produção de mudas. Nesse cenário, compreender os fatores que afetam a qualidade fisiológica e sanitária das sementes e a avaliação de tratamentos alternativos, como a aplicação do gás ozônio, representa uma estratégia para a superação de desafios fitossanitários.

Mimosa caesalpiniiifolia Benth.

Mimosa caesalpiniiifolia Benth. é também popularmente conhecida como a sabiá, sansão-do-campo, angiquinho e unha de gato. Pertence à família Fabaceae. É uma planta pioneira, decídua e heliófita, que ocorre preferencialmente em solos profundos, tanto em formações primárias quanto secundárias (Maia, 2004).

As folhas são do tipo parabipinadas (2 - 4 – julgadas), onde cada pina é comumente provida de 3 a 4 pares de folíolos crescentes para o ápice. A sabiá varia de arbusto a árvore perenifólia, podendo atingir dimensões de aproximadamente de 10 m de altura e com 30 cm de diâmetro do caule à altura do peito na idade adulta (Brito *et al.*, 2021).

Essa espécie é nativa da região Nordeste do Brasil com ocorrência subespontânea em vários estados da região do Nordeste (Ceará, Maranhão, Bahia, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte) e no Rio de Janeiro, mesmo com o clima úmido, além dos estados de Amazonas, Pará, São Paulo e Distrito Federal (Brito *et al.*, 2021).

Devido à sua natureza pioneira, a sabiá é amplamente utilizada como cerca viva e é ideal para a recuperação de áreas degradadas (Lorenzi, 2000). A inflorescência é do tipo panículas de espigas, com flores brancas pequenas e suavemente perfumadas. As sementes são pequenas, ovóides apresentando superfície lisa e lustrosa de cor marrom (Brito, *et al.*, 2021).

Essa árvore possui características ornamentais e sua madeira é adequada para usos externos, como mourões, estacas, postes, lenha e produção de carvão. Suas folhas são utilizadas como alimento para o gado, especialmente durante a época seca no semiárido (Brito *et al.*, 2021).

Além de suas múltiplas utilizações e características morfológicas, a qualidade sanitária das sementes de *Mimosa caesalpiniiifolia* também tem sido objeto de investigação. Em estudo realizado por Mendes *et al.* (2005), foram identificados fungos como *Fusarium solani*, *Pestalotiopsis* sp. e *Phomopsis* sp. em sementes de sabiá, com predominância superficial. Apesar da presença desses microrganismos, observou-se baixa patogenicidade e ausência de transmissão para as plântulas.

O uso de sementes sadias e vigorosas é condição necessária para uma melhor aplicação dos potenciais socioeconômicos das espécies e nas ações voltadas à restauração de áreas degradadas, especialmente na Caatinga.

Nessa conjuntura, práticas que contribuam para a melhoria da qualidade fisiológica e sanitária das sementes florestais, tornam-se estratégicas do ponto de vista técnico, assim como no desenvolvimento das políticas públicas e aos programas de restauração ecológica que vêm sendo fortalecidos nos últimos anos. O tratamento de sementes com o gás ozônio é uma alternativa promissora, garantindo baixo impacto ambiental, conservação da biodiversidade e o uso sustentável dos recursos florestais nativos da Caatinga.

2.2 Ozônio na sanitização de sementes

2.1.1 Características e propriedades do ozônio

As principais características físico-químicas da molécula de ozônio (O_3) estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais características físico-químicas da molécula de ozônio (O_3) e do oxigênio (O_2).

Propriedade	Ozônio	Oxigênio
Coloração	Azul	Incolor
Cheiro	Cheiro característico	Sem cheiro
Solubilidade em água (0°C)	0,64	0,049
Densidade (g/L)	2,144	1,429
Potencial eletroquímico (Volts)	02:07	01:23
Peso molecular	48	32
Ponto de ebulição (a 760 mmHg)	-111,9°C	-182,96°C
Ponto de fusão	-192,7°C	-218,4°C
Peso específico do gás em líquido em -183 °C	1,571	1,14
Solubilidade (cm ³) em 100 ml de água (a 0°C)	49,0/0,02 M	4,89/1,5x10 ⁻³ M

O ozônio é composto por três átomos de oxigênio, caracterizada por um odor marcante, que pode ser percebido mesmo em concentrações inferiores a 0,01 ppm. Não há consenso na literatura quanto a descrição desse odor, que já foi comparado a enxofre, cloro, fósforo e até mesmo ao de lagosta ou peixe (Chibante; Heymann, 1993).

O comportamento físico do ozônio varia de acordo com seu estado de agregação. Na fase gasosa, apresenta-se como um gás incolor; por outro lado, na fase líquida, apresenta uma coloração azul bastante pálida. No entanto, em concentrações comumente empregadas em aplicações industriais, essa coloração torna-se imperceptível ao olho nu (Varga; Szigeti, 2016).

Observações realizadas por meio de um tubo com aproximadamente 2 m de comprimento, no sentido longitudinal, revelam uma tonalidade azul céu, evidenciando a presença da substância em maior espessura ótica (Guzel-Seydim *et al.*, 2004 ; Wysok *et al.*, 2006; Pascual *et al.*, 2007; Freitas-Silva e Venâncio 2010; O'Donnell *et al.*, 2012; Patil e Bourke 2012).

É gerado pela reação de radicais livres de oxigênio com moléculas de O_2 altamente instável em qualquer forma, existem vários métodos para a geração de ozônio, incluindo descarga de corona elétrica, radiação ultravioleta UV, métodos térmicos, químicos entre outros (Horvath *et al.* 1985 ; Kim *et al.* 1999 ; Khadre *et al.* 2001 ; Patil e Bourke 2012).

2.1.2 Histórico de uso

Os primeiros relatos sobre o gás ozônio são datados de 1785 quando Van Marum, um físico holandês, observou que a descarga elétrica em ar resulta em um odor bastante característico (Oliveira; Wosch, 2012).

A primeira instalação de ozônio em escala industrial ocorreu em 1893, em Oudshoorn, na Holanda, objetivando a desinfecção de água na estação de tratamento de água potável desta cidade (Wei *et al.*, 1985). As técnicas de ozonização foram desenvolvidas mais significativamente nos últimos 40 anos, particularmente na França, na Alemanha Ocidental e na Suíça (Lapolli *et al.*, 2003). Nos Estados Unidos, o interesse pelo processo de ozonização no tratamento de águas iniciou-se após a identificação dos compostos halogenados que são gerados a partir da cloração (Rice *et al.*, 1981). Além disso, uma variedade de aplicações tem surgido para o ozônio, sobretudo devido aos novos conhecimentos quanto às suas características e propriedades.

2.1.3 Aplicações do ozônio

O ozônio (O_3) tem sido amplamente utilizado em diversas aplicações, como a conservação e prolongamento da vida útil de frutas e vegetais; além da redução de patógenos entre; no tratamento de reuso de água e efluentes; no acondicionamento da água das piscinas; na desodorização; em lavanderias hospitalares (Campos, 2005; Campos 2006; Chawla, 2006; Chiallone, 2006; Embrapa, 2006; Vlassi *et al.*, 2018). Sua eficácia foi comprovada contra diversos microrganismos responsáveis pela deterioração e contaminação de frutas, vegetais, grãos e seus derivados (Spanoghe *et al.*, 2016; Bateller *et al.*, 2018; Piacentini *et al.*, 2017; Savi *et al.*, 2020; Zhuang *et al.*, 2020; Çetinkaya *et al.*, 2022).

Os efeitos da exposição das sementes ao ozônio foram estudados e um método que beneficia a germinação das sementes resultando na patente por Yvin e Coste (1995), e o outro desenvolvido por Klaptchuk (2004), destinado à esterilização de sementes e a degradar herbicidas residuais por meio do uso do ozônio. De acordo com Brito Júnior (2013), outra vantagem do uso do ozônio é sua possibilidade de geração no próprio local de aplicação, além de ser um dos agentes oxidantes.

Pesquisas apontam que o gás ozônio pode atuar como um potente agente antimicrobiano, podendo atuar na inativação do desenvolvimento de espécies fúngicas. Em culturas agrícolas, o ozônio demonstrou eficácia na inibição ou no retardamento do crescimento de fungos pertencentes aos gêneros *Fusarium*, *Geotrichum*, *Mucor*, entre outros (Raila *et al.*, 2006; Wi *et al.*, 2008).

Kells *et al.*, (2001), ao avaliarem a eficácia do ozônio como fumigante na desinfestação de milho armazenado, constataram que o tratamento de 8,9 toneladas de grãos de milho com 50 ppm de ozônio, durante três dias, resultou em numa taxa de mortalidade entre 92 e 100% de adultos de *Tribolium castaneum* e *Sitophilus zeamais*, de larva de *Plodia interpunctella*. Além disso, observou-se uma redução em 63% no nível de contaminação do fungo *Aspergillus parasiticus*.

Os autores também citam o estudo de Erdmam (1980) que observou a mortalidade de larvas de *T. castaneum* e *T. confusum*, após exposição ao ozônio na concentração de 45 ppm, evidenciando a ação do gás sobre diferentes estágios de desenvolvimento de espécies indesejadas no armazenamento.

No estudo realizado por Rodrigues *et al.* (2021), concluíram que o gás ozônio, nas concentrações e tempos de exposição avaliados, configura-se como uma alternativa viável e sustentável para o controle de patógenos em sementes de pimentão, sem comprometer sua qualidade fisiológica e bioquímica. A partir de 20 minutos de exposição, foi observada uma melhora significativa na qualidade sanitária das sementes, destacando o potencial do ozônio como substituto ao tratamento químico convencional utilizado no estudo, o Captan®.

No entanto, segundo Wu *et al.*, (2006) a exposição prolongada ao gás ozônio pode ocasionar redução na taxa de germinação de sementes de trigo. De forma semelhante, Violleau *et al.*, (2008) sugerem que períodos prolongados de ozonização podem ser prejudiciais à qualidade das sementes. Contudo, os autores não especificam de forma clara o que caracterizaria um “período prolongado”, o que limita a interpretação dos resultados.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Área de Estudo

Os frutos das espécies florestais utilizadas neste estudo foram coletados de populações naturais localizadas no Parque Nacional da Fuma Feia (05°04'14,88" S; 37°32'01,51" O), entre julho e setembro de 2023. A unidade de conservação, criada em 05 de junho de 2012, está situada entre os municípios de Baraúna (55,65%) e Mossoró (44,35%), no estado do Rio Grande do Norte, sendo administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio (BRASIL, 2012; ICMBio, 2020).

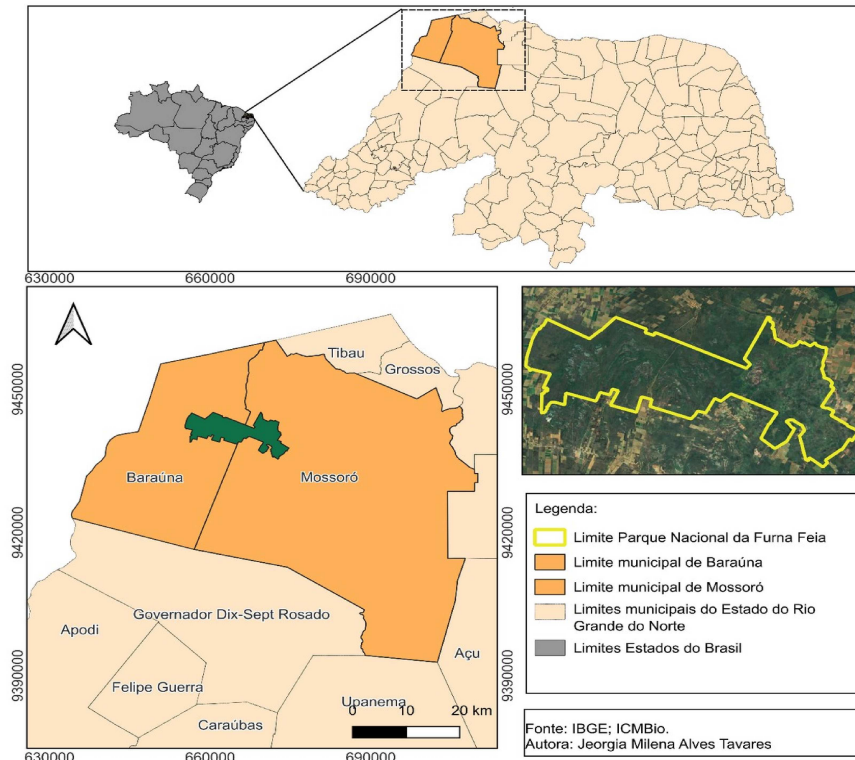
As espécies selecionadas foram *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir. (jurema-preta), *Piptadenia retusa* (Jacq.) P.G. Ribeiro, Seigler & Ebinger (jurema-branca) e *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. (sabiá), representativas da flora da Caatinga e de reconhecida relevância ecológica e socioeconômica.

Para a seleção e marcação das matrizes (Figura 2 e 3), foi utilizado o método de caminhamento com o auxílio de imagens de satélite do Google Earth e GPS. Os indicativos de maturidade dos frutos utilizados foram a mudança na coloração ou o início da deiscência, seguindo protocolo de Davide *et al.*, (1995). Bem como, conformação da copa, ausência de cupins, estágio adulto e padrão de ocorrência espacial (isoladas ou em agrupamentos).

A coleta foi realizada com auxílio de equipamentos telescópicos e lona impermeável para evitar contato dos frutos com o solo, conforme protocolos de boas práticas em coleta de sementes (Davide *et al.*, 1995). Para a coleta dos frutos foi utilizada uma lona 2,0 m x 2,0 m impermeável para evitar o contato direto dos frutos com o solo, além de um cesto coletor de frutas forrado com uma tela de sombreamento para impedir a perda de material. (Figura 3B). Logo após a coleta, os frutos foram acondicionados em sacos plásticos (Figura 3C) e levados para o Laboratório de Conservação Florestal da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (Figura 3D) para beneficiamento das sementes (Figura 3E).

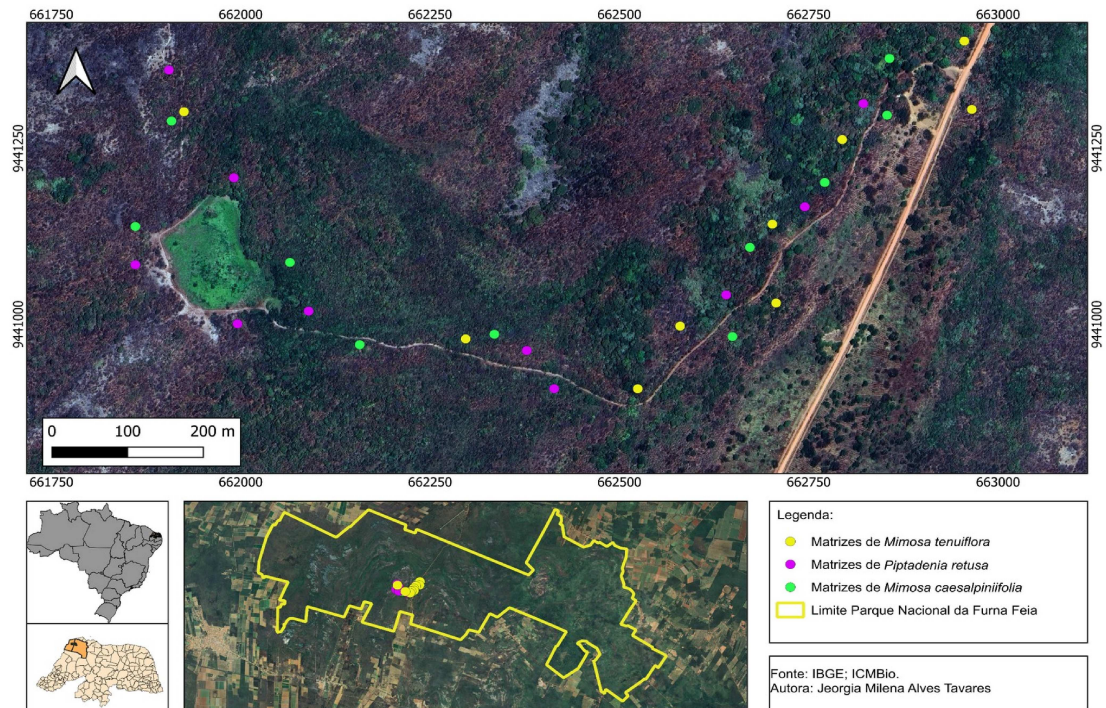
As sementes provenientes de todas as árvores matrizes foram misturadas formando um único lote homogêneo. Após o beneficiamento, as sementes foram levadas para o Laboratório de Análise de Sementes (LAS) da UFRSA para armazenamento na câmara controlada a 17 °C com 45 % de umidade relativa do ar (UR).

Figura 1 - Localização do Parque Nacional Furna Feia, Baraúna e Mossoró-RN.



Fonte: autoria própria.

Figura 2 - Localização dos indivíduos matrizes no Parque Nacional Furna Feia, Baraúna e Mossoró-RN.



Fonte: autoria própria.

Figura 3 - Marcação das árvores matrizes e coletas dos frutos no Parque Nacional Fuma Feia, Baraúna e Mossoró, RN. Identificação e marcação (A). Coleta de frutos das matrizes (B). Triagem e armazenamento dos frutos em campo (C). Beneficiamento das sementes no Laboratório de Conservação Florestal-UFERSA (D). Sementes beneficiadas (E).



Fonte: autoria própria.

3.2 Teste de sanitização das sementes

Sementes intactas (sem quebra de dormência) foram submetidas a cinco tempos de exposição ao ozônio, a saber: TC = controle (sem exposição ao ozônio), T15 (15 minutos), T30 (30 minutos), T45 (45 minutos) e T60 (60 minutos), correspondentes, respectivamente, em doses totais de ozônio de 0,0 g, 0,5 g, 1,0 g, 1,5 g e 2,0 g. O ozônio foi gerado por descarga elétrica em ar atmosférico e direcionado para a câmara cilíndrica de PVC com válvulas para controle do fluxo adaptado de Rodrigues *et al.* (2015) conforme ilustrado na Figura 4.

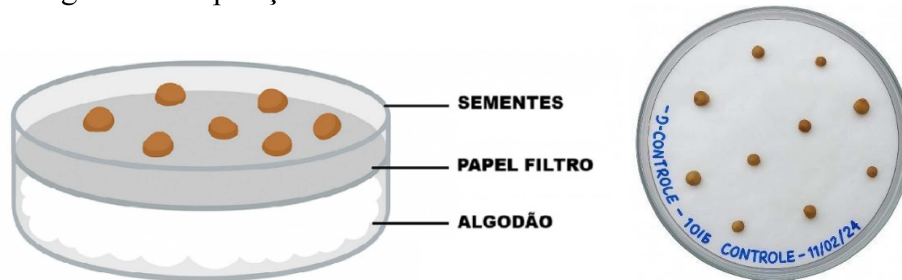
Para cada tempo de exposição, foi acondicionadas 25 sementes, com repetições, por espécie, em placas de Petri (11 cm de diâmetro), contendo algodão hidrófilo e papel filtro umedecidos com 20 mL de água destilada autoclavada. As placas foram mantidas em câmara úmida e incubadas em B.O.D. a 28 °C por 14 dias, com observações diárias de colônias fúngicas (Figura 5). Colônias com morfologia distinta foram isoladas em meio BDA suplementado com cloranfenicol (50 mg L⁻¹), para inibir bactérias. A identificação dos fungos foi realizada até o nível de gênero com base em chaves taxonômicas clássicas (Barnett; Hunter, 1998), utilizando microscopia ótica e registro fotográfico (Figura 6). A contagem de sementes contaminadas foram expressos em percentagem. Todas as etapas de isolamento e identificação foram realizadas no Laboratório de Biotecnologia de Fungos (LabFungi) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

Figura 4 - Gerador de ozônio (O_3) (A). Visão interna do reator(B). Visão externa do reator com cestas para as sementes(C).



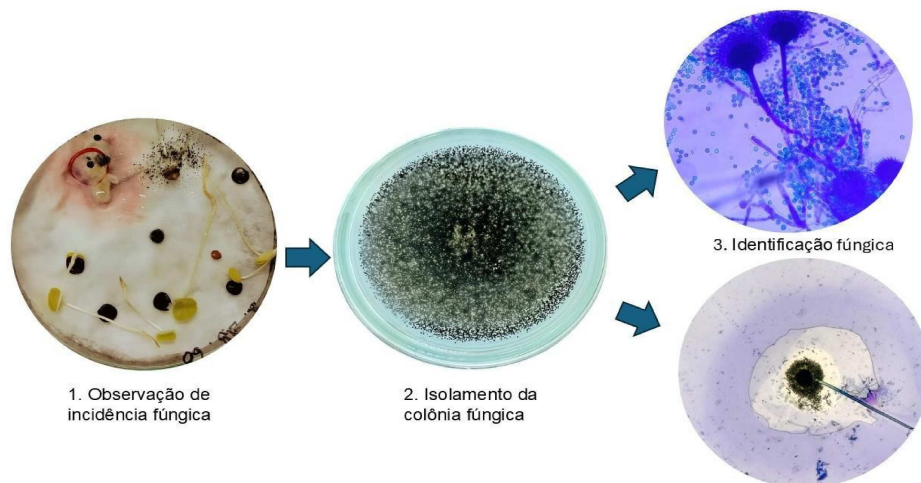
Fonte: autoria própria.

Figura 5 - Disposição das sementes inoculadas em câmara úmida.



Fonte: autoria própria.

Figura 6 - Esquema do processo de identificação de fungos



Fonte: autoria própria.

3.3 Teste de germinação

Para cada espécie e tempo de exposição, as sementes foram previamente submetidas ao despolimento com auxílio de alicate esterilizado. Foi utilizado como substrato o papel toalha esterilizado, previamente autoclavado em sacos de poliéster a 121 °C por 15 minutos. O umedecimento foi realizado com água destilada autoclavada na proporção de 2,5 vezes o peso do substrato seco. As sementes, 100 no total, foram posicionadas entre duas folhas de papel Germitest® e cobertas com uma terceira folha, formando rolos que foram acondicionados em sacos plásticos para minimizar a perda de umidade por 10 dias. Todo o processo foi realizado em cabine de segurança biológica Classe II B2 (modelo SBIIB2-960/4, Filterflux), a fim de evitar contaminações externas. As análises foram conduzidas no Laboratório de Biotecnologia de Fungos (LabFungi) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

Os rolos foram transferidos para a incubadora tipo Biochemical Oxygen Demand (BOD), com temperatura controlada a 30 °C e fotoperíodo de 12 horas, conforme preconizado pelas Instruções para Análise de Sementes de Espécies Florestais (BRASIL, 2025).

3.4 Variáveis analisadas

A percentual de germinação das sementes, foi realizada conforme Brasil (2025); o Índice de velocidade de germinação (IVG), durante 10 dias (Maguire, 1962); Tempo médio de germinação (Labouriau, 1983); Porcentagem da incidência de fungos, com avaliações diárias até 10º dia quanto a presença ou ausência de fungos visíveis e calculada (Rosário, 2022); Comprimento da parte aérea e do sistema radicular, determinado desde o colo até o meristema apical das plântulas, enquanto para o sistema radicular mensurou-se do colo até a extremidade da raiz principal, com auxílio de um paquímetro digital no 10º dia (Brasil, 2025); e a Massa seca da parte aérea e do sistema radicular (Nakagawa, 1999).

3.5 Análise estatística

As análises foram realizadas no software R 4.4.0 (R Core Team, 2024), com auxílio dos pacotes *tidyverse*, *car*, *ggpubr*, *emmeans*, *multcomp*, *ggplot2*, *glmmTMB* e *DHARMA*. Dada a violação dos pressupostos de normalidade e homogeneidade (testes de Shapiro-Wilk e Levene), as variáveis de germinação e biomassa foram analisadas por Modelos Lineares

Generalizados (GLMs) com distribuição Gamma e função de ligação logarítmica (McCullagh; Nelder, 1989; Zuur *et al.*, 2009).

Para germinação e biomassa, ajustaram-se GLMs considerando efeitos principais de espécie e tratamento, bem como suas interações. As comparações múltiplas foram conduzidas via *emmeans* com ajustes de Sidak e Tukey. Para a incidência de fungos em placas de Petri, empregou-se GLMM com distribuição binomial e efeito aleatório para repetição. A incidência de fungos no papel toalha foi analisada por GLM quasipoisson, adequado para contagens com sobredispersão, com contrastes múltiplos ajustados por Tukey.

As estimativas foram convertidas para a escala original e representadas graficamente com intervalos de confiança de 95%, assegurando rigor estatístico e clareza interpretativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Pressupostos e análises iniciais para o teste de germinação

Observa-se que, embora a velocidade média de germinação (VMG) tenha atendido ao pressuposto de normalidade, apresentou violação da homoscedasticidade. Já tempo médio de germinação (TMG), índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de germinação (PG) e porcentagem de fungos (PF) mostraram desvios significativos da normalidade, e PG e PF também não atenderam à homogeneidade de variâncias (Tabela 2). Esses resultados justificam a adoção de modelos estatísticos alternativos à ANOVA tradicional, uma vez que a violação dos pressupostos comprometeria a validade das comparações paramétricas (Zuur *et al.*, 2009).

Diante dessa limitação, optou-se pelo uso de Modelos Lineares Generalizados (GLMs), que permitem maior flexibilidade quanto à distribuição dos dados e são amplamente recomendados em experimentos de fisiologia de sementes (McCullagh; Nelder, 1989; Quinn; Keough, 2002). Essa escolha metodológica fortalece a confiabilidade dos resultados, especialmente quando se trabalha com variáveis biológicas que tendem a apresentar assimetrias ou sobredispersão, como destacado em estudos recentes de germinação sob estresse abiótico (Oliveira *et al.*, 2020; Almeida, 2023).

A análise de deviance dos GLMs revelou efeitos significativos do fator tempo de exposição ao ozônio em todas as variáveis fisiológicas (Tabela 3). Essa evidência reforça a hipótese de que a duração do contato com o gás exerce influência determinante sobre o desempenho germinativo e sobre a incidência de fungos.

Tabela 2 - Resultado dos testes de homogeneidade de variância (Levene) e de normalidade dos resíduos (Shapiro-Wilk) para as variáveis tempo médio de germinação (TMG), índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de germinação (PG) e porcentagem de fungos (PF)

Variável	Levene (F; p-valor)	Shapiro-Wilk (W; p-valor)
VMG	2,0173; 0,0434	0,9805; 0,5333
TMG	0,9043; 0,5604	0,9420; 0,0066
IVG	1,0582; 0,4200	0,9167; 0,0006
PG	2,4738; 0,0135	0,9117; 0,0008
PF	2,0397; 0,0401	0,8378; 3,668e-06

Resultados com $p < 0,05\%$ indicam violação de homoscedasticidade e/ou normalidade, respectivamente.

Tabela 3 - Análise de deviance (ANOVA - GLM) com efeitos principais e de interação para as tempo médio de germinação (TMG), índice de velocidade de germinação (IVG), porcentagem de germinação (PG) e porcentagem de fungos (PF), considerando os fatores espécie, tempo de exposição e concentração do ozônio.

Variável	Fator	LR Chisq	GL	Valor-p	Significância
VMG	Espécie	2,648	2	0,2661	Ns
	Tempo	189,425	4	< 2e-16	***
	espécie:tempo	106,916	8	< 2e-16	***
TMG	Espécie	27,596	2	1,01e-060	***
	Tempo	189,966	4	2,2e-16	***
	espécie:tempo	119,514	8	2,2e-16	***
IVG	Espécie	4,450	2	0,1081	Ns
	Tempo	53,215	4	7,684e-11	***
	espécie:tempo	35,011	8	2,661e-05	***
PG	Espécie	1,2446	2	0,536710	Ns
	Tempo	29,5793	4	5,961e-06	***
	espécie:tempo	23,9817	8	0,002308	**
PF	Espécie	3,7972	2	0,1498	Ns
	Tempo	14,0233	4	0,0072	***
	espécie:tempo	12,6512	8	0,1244	Ns

Valores do qui-quadrado (LR Chisq), grau de liberdade (GL) e significância estatística dos efeitos de espécie, tempo e da interação espécie:tempo sobre cada variável resposta, com base em modelos lineares generalizados (GLM). Níveis de significância: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns = não significativo.

Os resultados demonstram que, embora o fator espécie não tenha sido significativo para todas as variáveis, ele se destacou na determinação do tempo médio de germinação (TMG), evidenciando diferenças fisiológicas intrínsecas entre as três espécies. Além disso, a interação espécie $\times$ tempo foi significativa para VMG, TMG, IVG e PG, mas não para PF. Isso sugere que o efeito do ozônio sobre a germinação é dependente das características fisiológicas de cada espécie, enquanto a redução fúngica decorre majoritariamente da ação oxidante do gás, independentemente do material genético.

Esse resultado é consistente com estudos prévios que apontam a ação antifúngica do ozônio como ampla e não seletiva ao passo que sua influência sobre a germinação pode variar de acordo com a sensibilidade específica das sementes (Violleau *et al.*, 2008; Rodrigues *et al.*, 2021). Já para incidência de fungos, o ozônio atua de forma homogênea no controle fúngico, independentemente da espécie, o que indica que a ação antifúngica do ozônio está mais ligada às suas propriedades oxidantes do que às características fisiológicas das sementes, nesse contexto, pode-se sugerir a adoção do ozônio como sanitizante padrão de sementes florestais visando o sucesso da produção de mudas e sob a perspectiva econômica, pode representar uma alternativa de baixo custo e ambientalmente segura.

4.2 Efeito do tempo de exposição ao ozônio na germinação de sementes

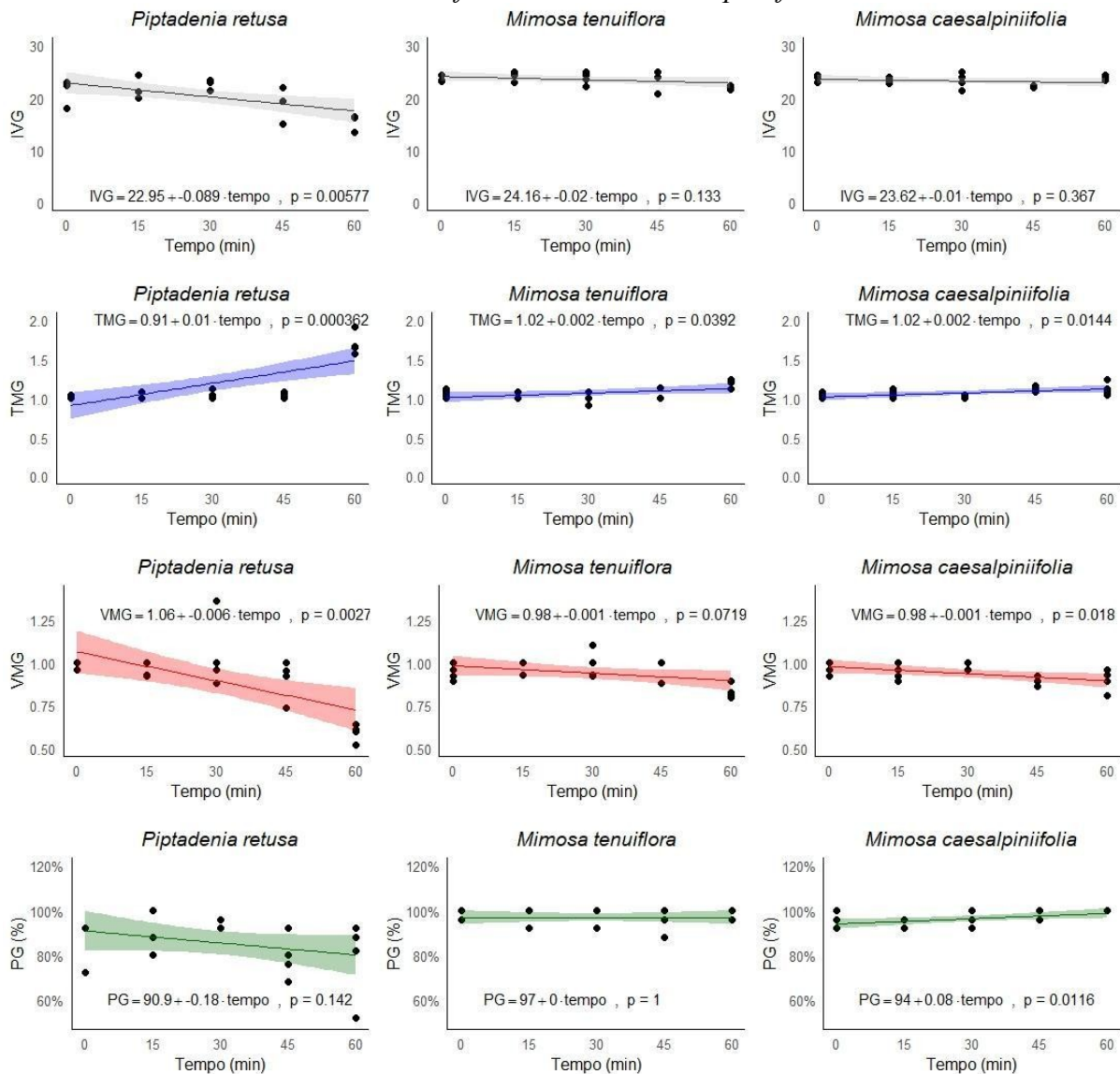
Os resultados obtidos evidenciam que o tempo de exposição ao ozônio influenciou de maneira diferenciada o desempenho germinativo das três espécies analisadas, reforçando a importância de considerar particularidades fisiológicas ao estabelecer protocolos de ozonização. A Figura 7 apresenta a distribuição dos valores médios e intervalos de confiança referentes ao índice de velocidade de germinação (IVG), tempo médio de germinação (TMG), velocidade média de germinação (VMG) e porcentagem de germinação (PG) em função do tempo de exposição.

No caso da *Piptadenia retusa*, observou-se que o aumento do tempo de exposição promoveu uma redução significativa do IVG ($p = 0,00577$), revelando efeito negativo sobre a velocidade de estabelecimento das plântulas. Essa espécie também apresentou aumento expressivo do TMG ($p = 0,000362$), indicando atraso na germinação, além de redução significativa da VMG ($p = 0,0027$), o que confirma o comprometimento da qualidade fisiológica das sementes. Embora a porcentagem final de germinação (PG) não tenha sofrido queda significativa ($p = 0,142$), o atraso na emergência compromete diretamente a competitividade das plântulas em ambientes naturais, aspecto relevante para programas de restauração florestal.

Já a *Mimosa tenuiflora* apresentou maior estabilidade frente ao tratamento. O IVG ($p = 0,133$) e a PG ($p = 1,0$) permaneceram inalterados ao longo dos tempos de exposição, sugerindo resiliência fisiológica. Contudo, observou-se aumento significativo do TMG ($p = 0,0392$), denotando certo atraso germinativo, ainda que de menor magnitude quando comparado a *P. retusa*. Esse comportamento pode estar associado à elevada plasticidade fisiológica da espécie, frequentemente relatada como adaptativa em ambientes de alta variabilidade hídrica da Caatinga (Bezerra, 2008; Magalhães *et al.*, 2018).

Por outro lado, a *Mimosa caesalpiniiifolia* apresentou comportamento distinto: o aumento do tempo de exposição resultou em incremento significativo da porcentagem de germinação ($p = 0,0116$), sugerindo que o ozônio atuou como indutor positivo, possivelmente favorecendo a superação de barreiras fisiológicas associadas à germinação. Ainda que a espécie tenha apresentado discreta redução da VMG ($p = 0,018$), os efeitos não comprometeram a germinação final, o que indica tolerância moderada à ozonização.

Figura 7 - Índice de velocidade de germinação (IVG), tempo médio de germinação (TMG) e velocidade média de germinação (VMG) e porcentagem de germinação (PG) em função do tempo de exposição e concentração do ozônio das sementes das espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpinifolia*.



Ajustes lineares para cada variável: IVG (linha superior), TMG (segunda linha), VMG (terceira linha) e PG (linha inferior), acompanhados de seus respectivos valores de p . As áreas sombreadas indicam os intervalos de confiança de 95% dos modelos.

Fonte: autoria própria.

De forma geral, os resultados confirmam que *P. retusa* é a espécie mais sensível ao ozônio, sofrendo impactos negativos tanto na velocidade quanto no tempo médio de germinação. Em contrapartida, *M. caesalpinifolia* respondeu de modo positivo, apresentando aumento da germinação em função da exposição. Já *M. tenuiflora* manteve padrões estáveis, corroborando sua reconhecida rusticidade ecológica. Para algumas espécies, o ozônio atua positivamente, aumentando vigor e qualidade fisiológica (Machado *et al.*, 2022; Barbara; Ballaris, 2021), enquanto em outras pode induzir perdas significativas na germinação em

função de propriedades oxidativas que degradam estruturas celulares (Rodrigues *et al.*, 2021; Normov *et al.*, 2019).

As contrastantes respostas, entre as espécies, reforçam a hipótese de que a ação do ozônio sobre a germinação não é universal, mas modulada por fatores fisiológicos intrínsecos a cada espécie. Estudos anteriores já demonstraram que a exposição controlada ao ozônio pode favorecer a quebra de dormência em determinadas espécies florestais (Almeida, 2023), enquanto em outras induz efeitos deletérios sobre a velocidade germinativa (Violleau *et al.*, 2008; Oliveira *et al.*, 2020).

Assim, devemos considerar a compreensão sobre os efeitos espécie-específicos da ozonização em sementes florestais da Caatinga, evidenciando que os protocolos de tratamento devem ser diferenciados de acordo com a sensibilidade fisiológica do material propagativo. Para fins práticos, recomenda-se cautela na aplicação de longos períodos de ozonização em *P. retusa*, ao passo que em *M. caesalpiniiifolia* o tratamento pode ser explorado como estratégia de incremento germinativo.

A *P. retusa* mostrou-se a espécie mais sensível ao estresse oxidativo induzido, apresentando reduções significativas de 38% na velocidade média de germinação (VMG) após 60 minutos de exposição (Tabela 4), acompanhadas por um aumento de 62% no tempo médio de germinação (TMG) no mesmo período (Tabela 5; $p < 0,0001$). Esses efeitos repercutiram em um decréscimo de 28% no índice de velocidade de germinação (IVG) em T60 (Tabela 6; $p < 0,0001$), ainda que a porcentagem de germinação (PG) tenha permanecido estatisticamente estável entre os tratamentos (Tabela 7; $p = 1,00$). A combinação desses resultados evidencia que exposições prolongadas comprometem a uniformidade e a eficiência da germinação, indicando que tempos superiores a 45 minutos devem ser evitados a fim de garantir a produção de mudas com vigor adequado. Recomenda-se, portanto, limitar a ozonização de *P. retusa* a intervalos inferiores a uma hora, preferencialmente até 45 minutos, assegurando efeito sanitizante sem prejuízos fisiológicos.

Em *M. tenuiflora*, os efeitos foram menos pronunciados. Observou-se redução de aproximadamente 14% na VMG em T60 (Tabela 4; $p = 0,03$) e aumento de 15% no TMG no mesmo tratamento (Tabela 5; $p = 0,01$), diferenças estatisticamente significativas em relação ao controle e aos demais tempos. No entanto, os parâmetros IVG (Tabela 6) e PG (Tabela 7) permaneceram estáveis ($p > 0,05$), sugerindo tolerância moderada ao ozônio. Essa resposta indica que aplicações de até 45 minutos podem ser utilizadas de forma segura, garantindo efeito descontaminante sem impacto expressivo no desempenho germinativo.

Tabela 4 - Média e desvio padrão da velocidade média de germinação (VMG) em relação ao tempo de exposição e concentração do ozônio para as espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpinifolia* e valores do p dos contrastes ortogonais.

Tratamentos	Espécie		
	<i>Piptadenia retusa</i>	<i>Mimosa tenuiflora</i>	<i>Mimosa caesalpinifolia</i>
VMG			
Controle	0,99 ± 0,02	0,94 ± 0,05	0,97 ± 0,04
T15	0,94 ± 0,04	0,97 ± 0,04	0,94 ± 0,05
T30	0,95 ± 0,06	0,99 ± 0,08	0,99 ± 0,02
T45	0,90 ± 0,11	0,97 ± 0,06	0,88 ± 0,03
T60	0,59 ± 0,05	0,83 ± 0,04	0,90 ± 0,07
Contrastes	Valor de p		
Controle vs T15	0,71 ns	0,97 ns	0,95 ns
Controle vs T30	0,82 ns	0,75 ns	0,98 ns
Controle vs T45	0,15 ns	0,95 ns	0,14 ns
Controle vs T60	<0,0001***	0,03*	0,30 ns
T15 X T30	1,00 ns	0,98 ns	0,80 ns
T15 X T45	0,86 ns	1,00 ns	0,57 ns
T15 X T60	<0,0001***	0,01*	0,80 ns
T30 X T45	0,85 ns	0,99 ns	0,08 ns
T30 X T60	<0,0001***	0,002**	0,19 ns
T45 X T60	<0,0001***	0,01**	1,00 ns

Tabela 5 - Média e desvio padrão do tempo médio de germinação (TMG) em relação ao tempo de exposição e contração de ozônio para as espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpinifolia* e valores do p dos contrastes ortogonais.

Tratamento	Espécie		
	<i>Piptadenia retusa</i>	<i>Mimosa tenuiflora</i>	<i>Mimosa caesalpinifolia</i>
TMG			
Controle	1,01 ± 0,02	1,06 ± 0,05	1,03 ± 0,04
T15	1,06 ± 0,04	1,04 ± 0,05	1,06 ± 0,06
T30	1,06 ± 0,07	1,02 ± 0,08	1,01 ± 0,03
T45	1,05 ± 0,05	1,03 ± 0,07	1,14 ± 0,04
T60	1,70 ± 0,15	1,20 ± 0,05	1,12 ± 0,09
Contrastes	Valor de p		
Controle vs T15	0,55 ns	0,98 ns	0,89 ns
Controle vs T30	0,75 ns	0,80 ns	0,99 ns
Controle vs T45	0,87 ns	0,96 ns	0,05 ns
Controle vs T60	<0,0001***	0,01*	0,14 ns
T15 X T30	0,99 ns	0,99 ns	0,73 ns
T15 X T45	0,99 ns	1,00 ns	0,38 ns
T15 X T60	<0,0001***	0,004*	0,66 ns
T30 X T45	0,99 ns	1,00 ns	0,03*
T30 X T60	<0,0001***	0,001**	0,09 ns
T45 X T60	<0,0001***	0,003**	0,99 ns

A espécie *Mimosa caesalpinifolia* destacou-se pela maior tolerância ao ozônio, mantendo estabilidade nos parâmetros VMG (Tabela 3), TMG (Tabela 5), IVG (Tabela 6) e PG (Tabela 7), sem diferenças significativas entre os tratamentos, exceto pela variação pontual observada entre T30 e T45 no TMG (Tabela 5; $p = 0,03$). Esses resultados reforçam a robustez fisiológica da espécie frente à ozonização, permitindo aplicações de até 45 minutos com segurança, sem comprometimento da qualidade fisiológica. Essa característica posiciona

M. caesalpiniiifolia como candidata promissora em protocolos padronizados de sanitização de sementes nativas da Caatinga.

Tabela 6 - Média e desvio padrão do índice de velocidade de germinação (IVG) em relação ao tempo de exposição ao ozônio para as espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpiniiifolia* e valores do p dos contrastes ortogonais.

Tratamento	Espécie		
	<i>Piptadenia retusa</i>	<i>Mimosa tenuiflora</i>	<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>
IVG			
Controle	21,60 ± 2,43	23,70 ± 0,45	23,90 ± 0,63
T15	21,70 ± 1,83	24,20 ± 0,84	23,40 ± 0,48
T30	22,40 ± 1,03	23,80 ± 1,14	23,40 ± 1,49
T45	19,60 ± 3,30	23,70 ± 1,98	22,10 ± 0,25
T60	15,40 ± 1,69	22,20 ± 0,44	24,00 ± 0,50
<i>Contrastes</i>	<i>Valor de p</i>		
Controle vs T15	1,00 ns	0,99 ns	1,00 ns
Controle vs T30	0,96 ns	1,00 ns	0,99 ns
Controle vs T45	0,34 ns	1,00 ns	0,58 ns
Controle vs T60	<0,0001***	0,77 ns	1,00 ns
T15 X T30	0,98 ns	1,00 ns	1,00 ns
T15 X T45	0,29 ns	1,00 ns	0,81 ns
T15 X T60	<0,0001***	0,54 ns	0,99 ns
T30 X T45	0,10 ns	1,00 ns	0,82 ns
T30 X T60	<0,0001***	0,69 ns	0,99 ns
T45 X T60	<0,0001***	0,75 ns	0,60 ns

Tabela 7 - Média e desvio padrão da porcentagem de germinação (PG) em relação ao tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpiniiifolia* e valores do p dos contrastes ortogonais.

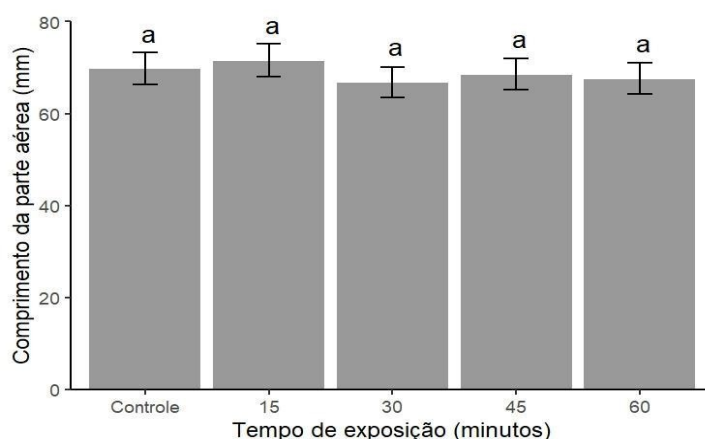
Tratamento	Espécie		
	<i>Piptadenia retusa</i>	<i>Mimosa tenuiflora</i>	<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>
PG			
Controle	87,00 ± 10,00	97,00 ± 2,00	95,00 ± 3,83
T15	89,00 ± 8,00	98,00 ± 4,00	95,00 ± 2,00
T30	94,00 ± 2,31	96,00 ± 4,62	95,00 ± 3,83
T45	79,00 ± 10,00	96,00 ± 5,66	97,00 ± 2,00
T60	79,00 ± 18,10	98,00 ± 2,31	100,00 ± 0,00
<i>Contrastes</i>	<i>Valor de p</i>		
Controle vs T15	1,00 ns	1,00 ns	1,00 ns
Controle vs T30	0,69 ns	1,00 ns	1,00 ns
Controle vs T45	0,48 ns	1,00 ns	1,00 ns
Controle vs T60	0,42 ns	1,00 ns	0,91 ns
T15 X T30	0,89 ns	1,00 ns	1,00 ns
T15 X T45	0,27 ns	1,00 ns	1,00 ns
T15 X T60	0,23 ns	1,00 ns	0,91 ns
T30 X T45	0,04*	1,00 ns	1,00 ns
T30 X T60	0,03*	1,00 ns	0,91 ns
T45 X T60	1,00 ns	1,00 ns	0,99 ns

No desenvolvimento inicial das plântulas, a análise global do comprimento da parte aérea (Figura 8) demonstrou que a exposição ao ozônio não influenciou significativamente

esse parâmetro, independentemente da espécie, corroborando com a ausência de efeito na massa da parte aérea (Figura 10). Esse comportamento sugere que o ozônio, nas condições testadas, não compromete o crescimento vegetativo inicial acima do solo, fator de relevância prática para viveiros florestais, pois garante que a copa e a arquitetura aérea primária não são afetadas.

Entretanto, diferenças relevantes foram observadas no sistema radicular (Figura 9). Em *P. retusa*, o tratamento de 15 minutos promoveu incremento significativo na massa seca de raiz ($p < 0,05$), efeito associado ao fenômeno de hormese, no qual baixas doses de um agente estressor induzem estímulos fisiológicos positivos. Esse resultado está alinhado ao relatado por Sudhakar *et al.* (2011), que observaram aumento do desenvolvimento radicular em sementes de tomate (*Lycopersicon esculentum*) submetidas a baixas doses de ozônio. Contudo, em tempos mais longos, os benefícios não foram mantidos, sugerindo um limiar fisiológico de tolerância. Para *M. tenuiflora* e *M. caesalpiniifolia*, não foram registradas diferenças significativas nos parâmetros radiculares ou na biomassa (Figuras 9 e 10), reforçando a maior resiliência dessas espécies.

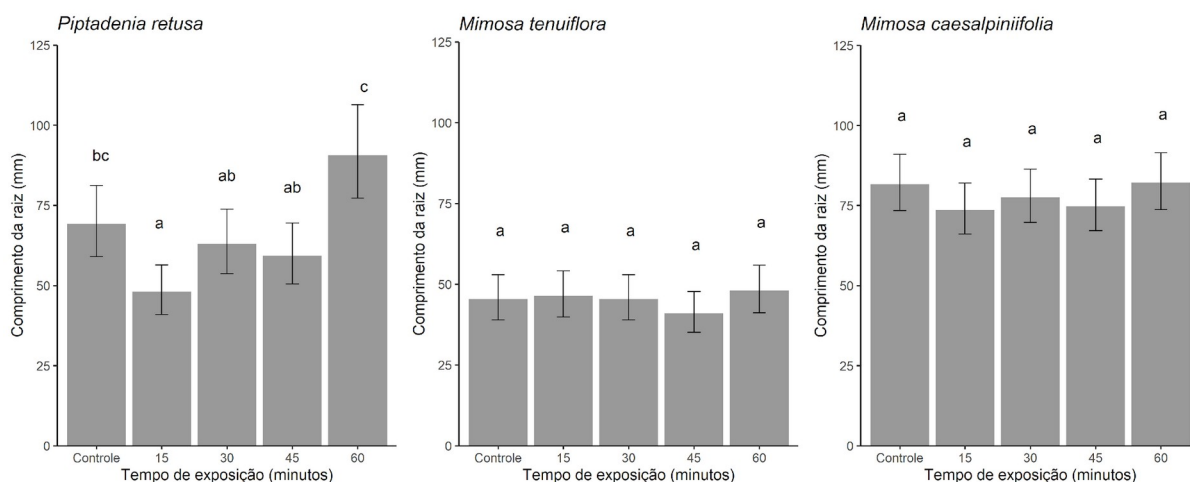
Figura 8 - Média e desvio padrão do comprimento da parte aérea (mm) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies avaliadas.



As colunas representam as médias marginais ajustadas estimadas pelo modelo linear generalizado (GLM) com distribuição Gamma e função de ligação logarítmica. As barras verticais indicam o erro padrão da média. Letras iguais indicam ausência de diferença significativa entre os tratamentos, segundo o teste de comparações múltiplas de Tukey ($p > 0,05$).

Fonte: autoria própria.

Figura 9 - Média e desvio padrão do comprimento de raiz (mm) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpinifolia*.



As colunas representam as médias marginais ajustadas estimadas por modelos lineares generalizados (GLMs) com distribuição Gamma e função de ligação logarítmica, ajustados separadamente para cada espécie devido à interação significativa ($p < 0,05$). As barras verticais indicam o erro padrão da média. Letras distintas indicam diferenças significativas entre os tempos de exposição, segundo o teste de comparações múltiplas de Tukey ($p < 0,05$).

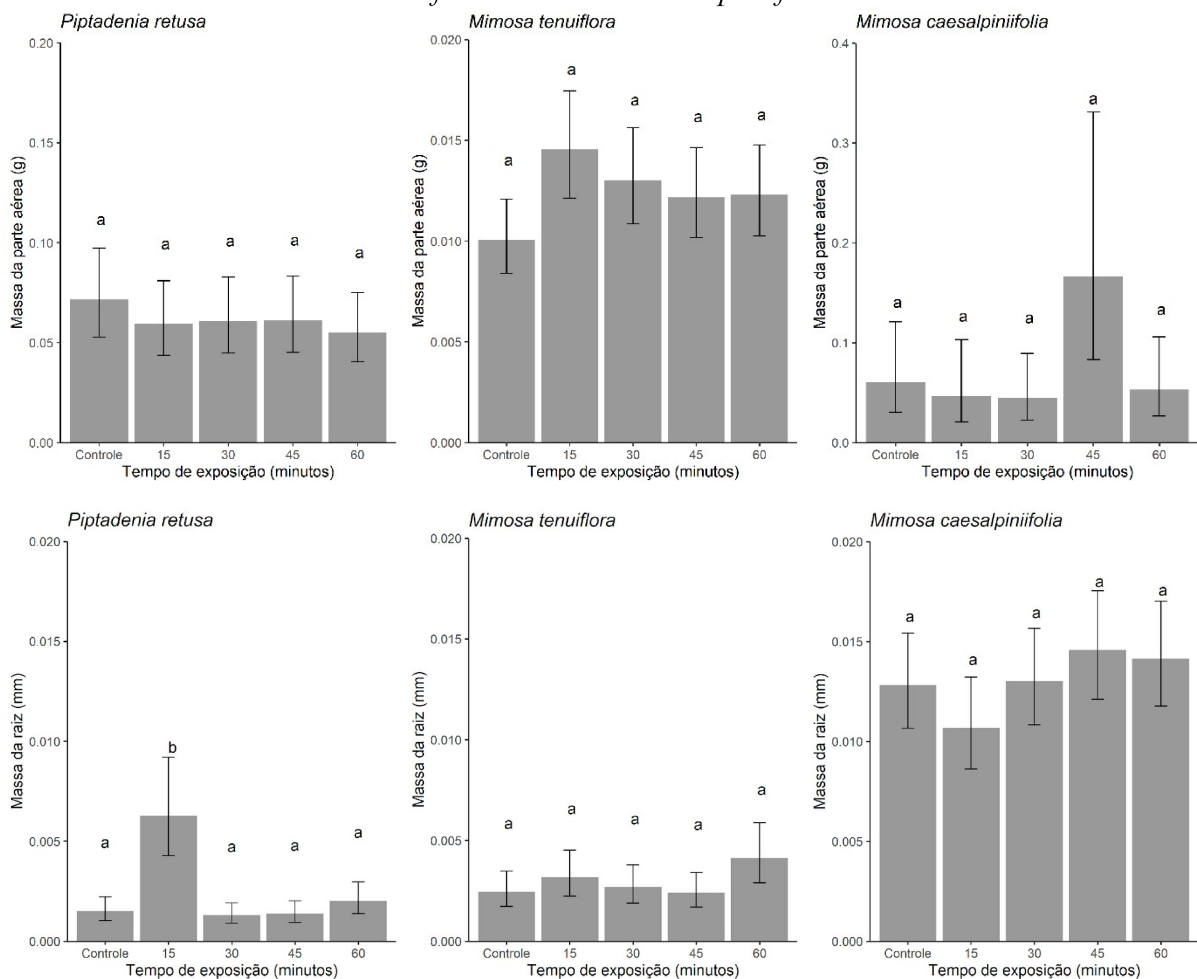
Os resultados desse estudo corroboram como investigações para cultura do trigo, realizado por Savi *et al.* (2014), os autores verificaram que a aplicação de ozônio por até duas horas não influenciou a germinação, mas após três horas houve redução de 12%, efeito atribuído por Zhu (2018) à redução da atividade enzimática e à ruptura de membranas celulares. De modo semelhante, Machado *et al.* (2022) observaram impacto positivo do ozônio sobre a germinação de sementes de amendoim, enquanto Barbara e Ballaris (2021) relataram manutenção e até incremento no vigor de sementes de milho, sorgo e feijão. Esses resultados reforçam que o efeito do ozônio é espécie-dependente, modulando a germinação por meio de alterações bioquímicas ligadas à integridade celular e ao metabolismo oxidativo.

No presente estudo, a alta sensibilidade de *P. retusa* ao ozônio, expressa pela redução no IVG, pelo aumento no TMG e pela diminuição da massa radicular, sugere um comprometimento dos processos metabólicos iniciais da germinação, possivelmente relacionado à peroxidação lipídica e à inibição enzimática. Em contrapartida, *M. tenuiflora* e *M. caesalpinifolia* demonstraram maior eficiência na manutenção do desempenho germinativo, o que pode estar associado a respostas antioxidantes mais eficazes.

Tais resultados são coerentes com as interpretações de Sharma e Davis (1997), que atribuíram ao ozônio a capacidade de induzir a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), ativando rotas bioquímicas de defesa. Foyer e Noctor (2005) reforçam que o ciclo

ascorbato-glutationa exerce papel central na contenção de danos oxidativos em plantas expostas a estresses abióticos, incluindo o ozônio. Dessa forma, a modulação da germinação pelo ozônio pode ser compreendida como reflexo da fisiologia antioxidante específica de cada espécie, o que reforça a necessidade de protocolos de tratamento diferenciados, ajustados não apenas ao controle sanitário, mas também à preservação do desempenho fisiológico das sementes.

Figura 10 - Média e desvio padrão da massa da parte aérea e raiz (mm) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpinifolia*.



As médias foram estimadas por modelos lineares generalizados (GLMs) com distribuição Gamma e função de ligação logarítmica, ajustados separadamente para cada espécie em razão da interação significativa entre os fatores ($p < 0,05$). As barras verticais representam o erro padrão da média. Letras distintas indicam diferenças estatísticas significativas entre os tempos de exposição, conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$).

4.3 Efeito do tempo de exposição ao ozônio na contaminação fúngica

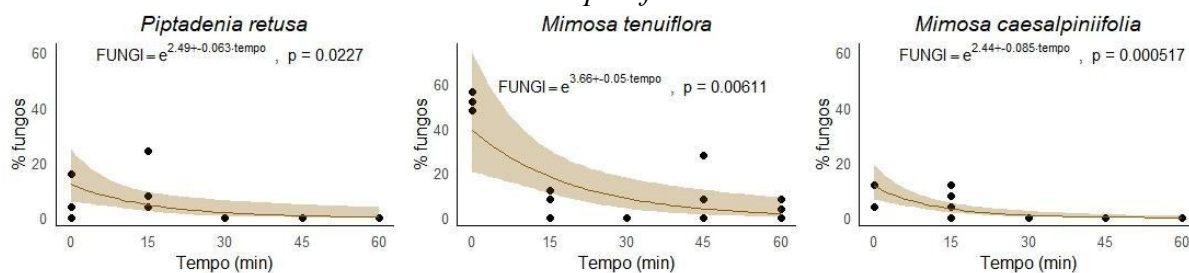
4.3.1 Análise da incidência de fungos: Papel Germitest®

Para todas as espécies analisadas a incidência de fungos apresentou redução significativa com o aumento do tempo de exposição ao ozônio (Figura 11), os ajustes exponenciais negativos foram estatisticamente significativos, evidenciando a efetividade do tratamento na desinfestação das sementes.

No caso de *P. retusa*, observou-se que a redução da contaminação fúngica foi mais expressiva até os 30 minutos de exposição, com o efeito sanitizante mantendo-se relativamente estável em tempos superiores. Para *M. tenuiflora*, a carga inicial de contaminação foi superior a 50%, representando a condição sanitária mais desfavorável entre as espécies avaliadas. Ainda assim, o ozônio mostrou-se eficiente na redução significativa da carga fúngica, confirmando sua ação mesmo em cenários críticos de contaminação. Já em *M. caesalpiniiifolia*, a resposta ao tratamento foi a mais pronunciada ($p = 0,000517$), com coeficiente de decaimento mais elevado e quase completa eliminação fúngica nos tempos de 15 e 30 minutos, evidenciando elevada sensibilidade dessa espécie ao ozônio (Figura 11).

Tal variação pode estar associada tanto à estrutura física das sementes quanto à composição da microbiota associada, fatores que interferem na taxa de desinfestação. De forma geral, tempos de exposição entre 15 e 30 minutos se mostraram suficientes para o controle fúngico efetivo, sobretudo em *M. caesalpiniiifolia*, sem comprometer a qualidade fisiológica das sementes

Figura 11 - Incidência de fungos (%) em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpiniiifolia*.



As curvas representam os modelos de regressão ajustados por espécie, com distribuição *quasipoisson* e função de ligação logarítmica. As áreas sombreadas correspondem aos intervalos de confiança de 95% da predição na escala da resposta. Equações e valores de p indicam a significância da relação entre o tempo de exposição e a incidência fúngica.

Do ponto de vista fitossanitário, a importância da redução da carga fúngica está associada ao impacto direto desses micro-organismos sobre a viabilidade das sementes, podendo levar à deterioração, à redução da germinação e, em casos mais graves, à morte (Brasil, 2009). O mecanismo de ação do ozônio envolve sua elevada capacidade oxidante, reagindo com componentes celulares críticos, como fosfolipídios de membrana, ácidos nucleicos e enzimas intracelulares, visto que em fungos, a parede celular é alvo direto desse processo, que pode comprometer a integridade celular e levar à morte do microrganismo (Pandiselvam *et al.*, 2019).

Entretanto, a eficácia antimicrobiana do ozônio pode ser modulada pela presença de matéria orgânica, estudos realizados por Kim; Yousef; Dave (1999) demonstram que compostos orgânicos reduzem rapidamente a concentração de ozônio disponível na solução, limitando sua ação. Mohammada *et al.* (2019), ao avaliarem sementes de alfafa, atribuíram a persistência de patógenos à interação do gás com a matéria orgânica presente. Dessa forma, a resposta espécie-específica observada neste estudo pode ser explicada pela variação na composição orgânica das sementes.

Resultados semelhantes foram reportados em outras culturas agrícolas, para cevada maltada, Sanches *et al.* (2024) verificaram que o ozônio gasoso reduziu significativamente a contagem de fungos e a incidência de *Fusarium* spp., embora tenham constatado que concentrações elevadas do gás, mais do que o tempo de exposição, prejudicaram a germinação. Em trigo, Savi *et al.* (2014) relataram que o ozônio foi eficiente no controle de *Fusarium graminearum* e na degradação da micotoxina DON (deoxinivalenol) após 120 minutos de exposição a 60 mmol/mol, sem alterar parâmetros físicos e bioquímicos dos grãos, embora exposições mais longas (180 minutos) tenham reduzido a germinação para 12,5%. Para arroz, Beber-Rodrigues (2013) verificou que, embora o ozônio tenha reduzido a carga total de fungos, os gêneros *Aureobasidium*, *Aspergillus*, *Penicillium* e leveduras apresentaram resistência relativa, enquanto *Acremonium* e *Alternaria* foram mais sensíveis.

Conforme Siqueira (2022), a composição da microbiota fúngica varia entre espécies florestais, o que corrobora a necessidade de protocolos diferenciados de tempo e concentração de exposição ao ozônio. Os resultados obtidos para as espécies estudadas evidenciam essa necessidade, em *M. caesalpiniifolia*, exposições curtas (15 a 30 minutos) foram suficientes para eliminar quase completamente os fungos; em *M. tenuiflora*, apesar da elevada contaminação inicial, o tratamento foi eficiente, mas deve-se ponderar seu uso visando preservar a qualidade fisiológica; já em *P. retusa*, a redução mais acentuada ocorreu até os 30 minutos, com estabilização do efeito em tempos superiores.

4.3.2 Teste de sanidade de sementes em placas

As equações logísticas ajustadas (Tabela 8) evidenciam a evolução da incidência de fungos, em porcentagem, ao longo de 14 dias de incubação das sementes para os diferentes tempos de exposição ao ozônio (Figura 12). O comportamento diferiu entre as espécies analisada, para *P. retusa*, o tratamento de 15 minutos (T15) foi o único a apresentar ausência total de incidência de fungos em todas as repetições, destacando-se como o protocolo mais eficiente para essa espécie. Esse resultado é corroborado pela estatística descritiva apresentada na Tabela 9, que mostra valores médios próximos a zero em todos os tempos de exposição, com desvio padrão nulo para T15.

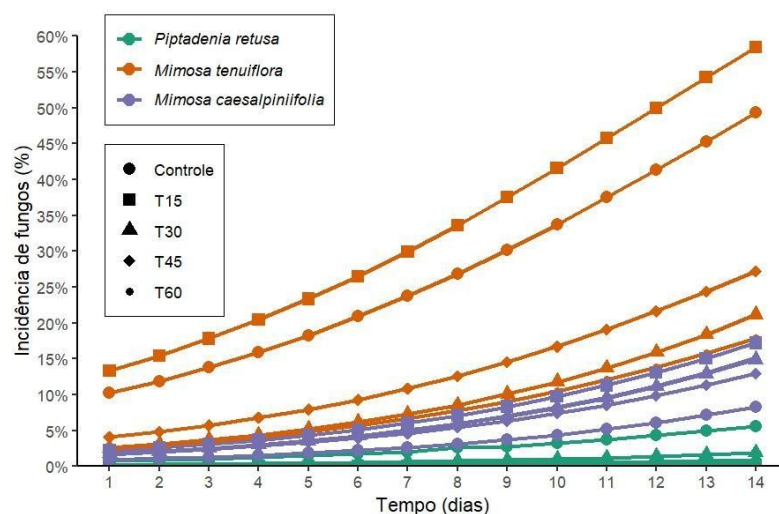
No caso de *M. caesalpiniiifolia*, a redução da incidência inicial de fungos aconteceu nos tempos de exposição ao ozônio mais elevados nos tratamentos com ozônio (Tabela 8) sugerem possível incremento na suscetibilidade fúngica. Esse padrão indica que exposições prolongadas podem comprometer mecanismos de defesa naturais, facilitando a colonização de fungos oportunistas (Savi *et al.*, 2015; Sanches *et al.*, 2024). A Tabela 9 reforça esse comportamento, uma vez que a média de incidência fúngica manteve-se estável entre 7 e 13% nos diferentes tempos de exposição, sem tendência de redução (Figura 13).

Tabela 8 - Equações logísticas ajustadas para a estimativa da incidência de fungos (%) ao longo do tempo (em dias) em sementes de *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Mimosa tenuiflora* e *Piptadenia retusa*, submetidas a diferentes tempos de exposição e concentrações de ozônio.

Espécie	Tratamento	Equação ajustada
<i>M. caesalpiniiifolia</i>	Controle	$p = 1 / (1 + \exp(-(-4,77 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T15	$p = 1 / (1 + \exp(-(-1.12 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T30	$p = 1 / (1 + \exp(-(-1,57 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T45	$p = 1 / (1 + \exp(-(-1,97 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T60	$p = 1 / (1 + \exp(-(-1,32 + 0.173 * \text{tempo})))$
<i>M. tenuiflora</i>	Controle	$p = 1 / (1 + \exp(-(-1,23 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T15	$p = 1 / (1 + \exp(-(-1.00 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T30	$p = 1 / (1 + \exp(-(-2,81 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T45	$p = 1 / (1 + \exp(-(-2,97 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T60	$p = 1 / (1 + \exp(-(-3,38 + 0.173 * \text{tempo})))$
<i>P. retusa</i>	Controle	$p = 1 / (1 + \exp(-(-6,18 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T15	$p = 1 / (1 + \exp(-(-8.37 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T30	$p = 1 / (1 + \exp(-(-7,66 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T45	$p = 1 / (1 + \exp(-(-7,89 + 0.173 * \text{tempo})))$
	T60	$p = 1 / (1 + \exp(-(-8,37 + 0.173 * \text{tempo})))$

As equações foram derivadas de modelo linear generalizado misto (GLMM) com distribuição binomial e função de ligação logit, em que p representa a probabilidade estimada de incidência de fungos.

Figura 12 - Predições ajustadas da incidência de fungos (%) ao longo de 14 dias, em sementes de *Piptadenia retusa*, *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpinifolia*, submetidas a diferentes tempos de exposição e concentração de ozônio.



Os pontos e linhas representam os valores preditos pelos modelos lineares generalizados mistos (GLMM) com distribuição binomial e função de ligação logit, ajustados para cada combinação de espécie e tratamento.

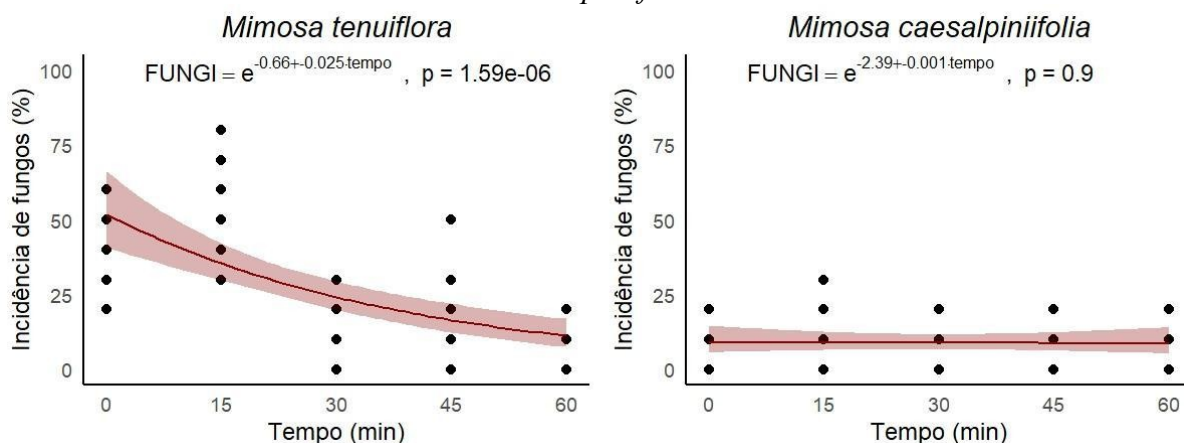
Tabela 9 - Estatística descritiva da incidência de fungos (%) no teste de sanidade em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies *Mimosa caesalpinifolia*, *Mimosa tenuiflora* e *Piptadenia retusa*.

Espécie		concentração de ozônio (%)				
		T0	T15	T30	T45	T60
<i>M. caesalpinifolia</i>	Média	7,00	13,00	9,00	9,00	10,00
	Desvio padrão	8,23	10,60	8,76	12,90	8,16
	Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máximo	20,00	30,00	20,00	40,00	20,00
<i>M. tenuiflora</i>	Média	47,00	53,00	16,00	19,00	14,00
	Desvio padrão	23,10	14,90	9,66	16,66	12,60
	Mínimo	20,00	30,00	0,00	0,00	0,00
	Máximo	100,00	80,00	30,00	50,00	40,00
<i>P. retusa</i>	Média	5,00	0,00	1,00	1,00	1,00
	Desvio padrão	9,72	0,00	3,16	3,26	3,16
	Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Máximo	30,00	0,00	10,00	10,00	10,00

Em contraste, *M. tenuiflora* apresentou elevada carga fúngica inicial (> 50%), mas respondeu significativamente ao tratamento com ozônio. Conforme indicado na Tabela 8, embora o tratamento de 15 minutos tenha resultado em intercepto positivo, refletindo maior probabilidade inicial de infecção em comparação ao controle, os tratamentos subsequentes (T30, T45 e T60) revelaram interceptos progressivamente menores, sugerindo efeito sanitizante crescente. Os resultados descritos na Tabela 9 confirmam que a média de incidência reduziu de 53% em T15 para apenas 14% em T60, com destaque para a redução

quase total observada em T30. A curva ajustada (Figura 13) evidencia esse padrão, em que a incidência de fungos diminuiu de forma exponencial negativa, corroborando a sensibilidade da microbiota associada de *M. tenuiflora* ao ozônio.

Figura 13 - Incidência de fungos (%) no teste de sanitização em função do tempo de exposição e concentração de ozônio nas sementes das espécies *Mimosa tenuiflora* e *Mimosa caesalpiniiifolia*.



As curvas representam os modelos de regressão ajustados por espécie, com distribuição *quasipoisson* e função de ligação logarítmica. As áreas sombreadas correspondem aos intervalos de confiança de 95% da predição na escala da resposta. Equações e valores de p indicam a significância da relação entre o tempo de exposição e a incidência fúngica.

No tocante à composição da comunidade fúngica, a diversidade morfológica registrada (Figura 14) e os dados apresentados na Tabela 10 revelam diferenças relevantes entre as espécies. Para *M. caesalpiniiifolia*, observou-se o surgimento de *Aspergillus* spp. nos tratamentos T15 a T60, ainda que ausente no controle, indicando que o ozônio pode ter suprimido gêneros mais sensíveis e favorecido a colonização por *Aspergillus* spp., conhecidos por sua resistência ao estresse oxidativo e potencial toxigênico (Círio; Lima, 2003). Esse achado é particularmente relevante, uma vez que mesmo baixas incidências representam risco à qualidade sanitária das sementes.

Em *M. tenuiflora*, *Aspergillus* spp. persistiu em todos os tratamentos, inclusive no controle, o que sugere uma associação simbiótica ou endofítica estável com a espécie, corroborando achados de Nascimento *et al.* (2017), que identificaram a ocorrência de *A. niger* em sementes dessa espécie. Entretanto, o ozônio foi eficaz na eliminação de *Penicillium* spp., microrganismo com reconhecido impacto na deterioração de sementes. O aparecimento de *Curvularia* spp. exclusivamente em T60 (Tabela 10) sugere que exposições mais prolongadas alteram o microambiente da semente, possivelmente reduzindo o efeito inibitório de

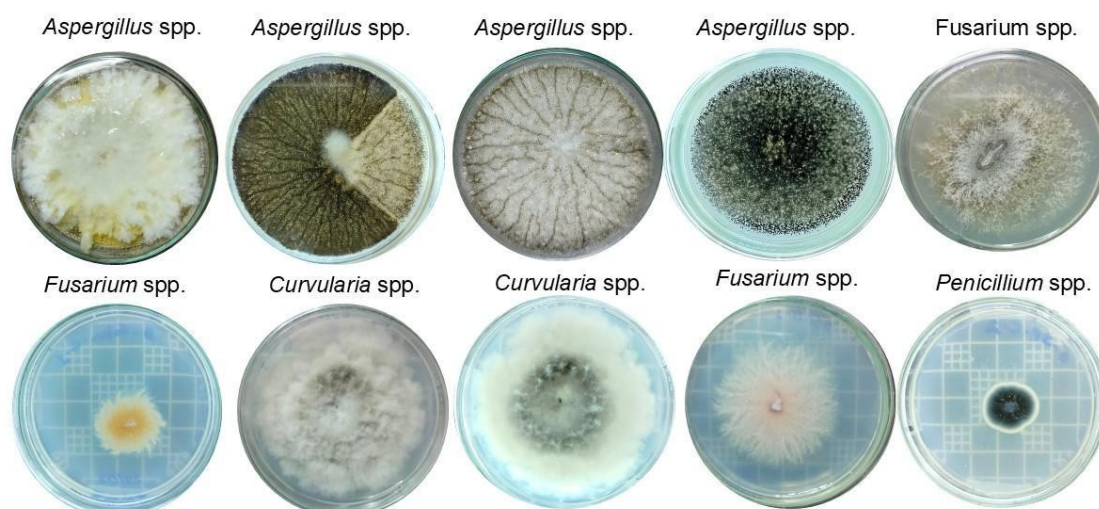
compostos alelopáticos já descritos para a espécie, permitindo o estabelecimento de novos gêneros fúngicos.

Tabela 10 - Gêneros de fungos incidentes nas sementes das espécies *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Mimosa tenuiflora* e *Piptadenia retusa* em função dos tempos de exposição e concentração do ozônio.

Espécie		<i>Aspergillus</i> spp.	<i>Curvularia</i> spp.	<i>Fusarium</i> spp.	<i>Penicillium</i> spp.	NI
<i>M. caesalpiniiifolia</i>	T0			x		
	T15	x				
	T30	x		x		
	T45	x				
	T60	x		x		
<i>M. tenuiflora</i>	T0	x			x	
	T15	x				
	T30	x				
	T45	x				
	T60	x	x			
<i>P. retusa</i>	T0	x				
	T15					
	T30					x
	T45					x
	T60					x

N.I.: não identificado por falta de estrutura reprodutiva.

Figura 14 - Diversidade morfológica das colônias fúngicas, com sete dias de crescimento, isoladas das sementes das espécies *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Mimosa tenuiflora* e *Piptadenia retusa*.



Fonte: Autoria própria.

Para *P. retusa*, o ozônio promoveu eliminação completa de *Aspergillus* spp. já em T15, com ausência de incidência fúngica nesse tratamento (Tabela 10). Nos tempos

subsequentes (T30 a T60), foram detectados apenas fungos não identificados (NI), possivelmente em razão da degradação de estruturas reprodutivas sob estresse oxidativo, que inviabilizou sua caracterização taxonômica. Esse comportamento confirma a eficácia do ozônio como agente sanitizante primário para *P. retusa*, especialmente em exposições curtas, representando vantagem operacional para viveiros com alta pressão de inóculo.

Esses resultados reforçam que a ação do ozônio não se limita à redução da carga fúngica total, mas também modula a composição da comunidade microbiana associada às sementes. A resposta distinta entre espécies evidencia que fatores como a composição química, a espessura do tegumento, a microbiota associada e a presença de compostos antifúngicos modulam a eficácia do tratamento. Nesse sentido, a ação sanitizante do ozônio deve ser compreendida como espécie-específica, exigindo protocolos calibrados de tempo e concentração, de forma a potencializar o efeito oxidativo sem comprometer a viabilidade germinativa (Wade *et al.*, 2003; Savi *et al.*, 2015; Mohammada *et al.*, 2019; Simplício *et al.*, 2020; Uzama, 2024; Sanches *et al.*, 2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A experiência com as três espécies avaliadas evidencia que não há uma resposta uniforme, pois cada espécie se comportou de maneira distinta, revelando a importância de compreender a interação entre características intrínsecas da semente, microbiota associada e estresse oxidativo induzido pelo tratamento.

Sob a perspectiva fisiológica, *P. retusa* destacou-se pela elevada sensibilidade ao ozônio, registrando redução na velocidade e na uniformidade da germinação em exposições prolongadas, mas também apresentou estímulo no crescimento radicular em 15 minutos, sugerindo que o estresse oxidativo, em níveis moderados, pode acionar mecanismos adaptativos. *M. caesalpinifolia*, por sua vez, manteve relativa estabilidade nos parâmetros germinativos, demonstrando maior tolerância, enquanto *M. tenuiflora* mostrou comportamento intermediário, com estabilidade fisiológica frente aos diferentes tempos de exposição. O crescimento da parte aérea, por sua vez, não sofreu alterações relevantes em nenhuma das espécies, reforçando que os benefícios fisiológicos do ozônio se manifestam de modo restrito.

No campo da sanidade, a resposta foi mais evidente. Em *P. retusa*, a inibição fúngica foi imediata e total a partir de 15 minutos de exposição. Em *M. tenuiflora*, a carga fúngica inicial elevada foi significativamente reduzida, sobretudo em 30 minutos, com destaque para a eliminação de *Penicillium* spp. Já em *M. caesalpinifolia*, os resultados apontaram ausência de reduções expressivas e até mesmo a persistência de gêneros tolerantes, como *Aspergillus* spp. Esse padrão sugere que, além de atuar sobre a carga fúngica, o ozônio também reorganiza a comunidade microbiana, favorecendo a sobrevivência de espécies mais resistentes ao estresse oxidativo.

Essas constatações indicam que o ozônio promoveu efeitos positivos sobre a germinação de forma pontual e variável entre espécies; mostrou benefícios limitados no desenvolvimento inicial das plântulas; comprovou sua eficácia na redução da incidência fúngica; mas não apresentou uniformidade de resposta, revelando diferenças substanciais entre espécies.

Finalmente, torna-se evidente a necessidade de avançar para uma compreensão mais profunda dos mecanismos bioquímicos e moleculares que regem a interação entre ozônio, microbiota e defesas antioxidantes. Estudos nesse sentido poderão fundamentar o uso responsável e eficiente dessa tecnologia, contribuindo para práticas mais seguras, sustentáveis

e alinhadas à demanda crescente por insumos de qualidade em programas de restauração ecológica no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, U. P. Implications of ethnobotanical studies on bioprospecting strategies of new drugs in semi-arid regions. **The Open Complementary Medicine Journal**, v. 2, n. 1, p. 21-23, 2010.
- ALBUQUERQUE, U. P.; ANDRADE, L. H. C. Conhecimento botânico tradicional e conservação em uma área de caatinga no estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 16, n. 3, p. 273-285, set. 2002.
- ALENCAR, E. R. et al. Ozonização de sementes de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): saturação e cinética de decomposição do ozônio e qualidade fisiológica das sementes. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 1019-1032, 2021. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/40762>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ALMEIDA, R. S. A. **Pequenos ruminantes e ozônio na superação da dormência de sementes florestais**. 2024. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/33629/1/RobevaniaDaSilvaAlvesAlmeida_Dissert.pdf. Acesso em: 1 abr. 2025.
- ALVES, E. U. et al. Influência do tamanho e da procedência de sementes *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth. sobre a germinação e vigor. **Revista Árvore**, v. 29, n. 6, p. 877-885, 2005.
- ALVES, M. C. S. et al. Superação da dormência em sementes de *Bauhinia monandra* Britt. e *Bauhinia unguolata* L. – Caesalpinoideae. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 22, n. 2, p. 139-144, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062004000400018>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ANDRADE, H. F. **Caracterização fitoquímica do extrato aquoso de *Caesalpinia pyramidalis* e avaliação de atividades biológicas**. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40577>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 8, p. 1353-1367, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0672-6>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ARAÚJO, H. F. P. et al. A perturbação humana é a principal causa da degradação da vegetação na região da Caatinga. **Scientific Reports**, v. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45571-9>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ARAÚJO FILHO, J. A. **Desenvolvimento sustentável da caatinga**. Sobral: Ministério da Agricultura/EMBRAPA/CNPC, 1996. 45 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/514827>. Acesso em: 31 jan. 2025.

ARAÚJO, A. C. et al. Análise quali-quantitativa da arborização no bairro Presidente Médici, Campina Grande-PB. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v. 4, n. 1, p. 133-144, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/revsbau.v4i1.66261>. Acesso em: 23 maio 2025.

AZEVEDO, S. M. A. et al. Crescimento de plântulas de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Wild.) Poiret) em solos de áreas degradadas da Caatinga. **Engenharia Ambiental**, v. 9, n. 3, p. 150-160, 2012. Disponível em: <http://ferramentas.unipinhal.edu.br/engenhariaambiental/viewarticle.php?id=745>. Acesso em: 23 maio 2025.

BARBARA, G.; BALLARIS, A. L. A qualidade fisiológica de sementes de cereais submetidas a diferentes concentrações de ozônio. **UNIFUNEC Científica Multidisciplinar**, Santa Fé do Sul, v. 10, n. 12, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://seer.unifunec.edu.br/index.php/rfc/article/view/4412>. Acesso em: 23 maio 2025.

BARNETT, H. L.; HUNTER, B. B. **Gêneros ilustrados de fungos imperfeitos**. 4. ed. St. Paul: APS Press, 1998. 218 p.

BATALLER, M. et al. Ozone applications in the post-harvest of papaya (*Carica papaya* L.): an alternative to Amistar fungicide. **Ozone: Science & Engineering**, v. 34, n. 3, p. 151-155, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01919512.2012.662728>. Acesso em: 23 maio 2025.

BERNATE, I. et al. Impact of ozone exposure on the biochemical composition of wheat, broccoli, alfalfa, and radish seeds during germination. **Agronomy (Basel, Switzerland)**, v. 14, n. 11, p. 2571, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14112571>. Acesso em: 23 maio 2025.

BENTO, S. R. S. O. et al. Eficiência dos testes de vigor na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de mulungu (*Erythrina velutina* WILLD.). **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 32, n. 4, p. 111-117, jun. 2010.

BEZERRA, D. A. C. **Abordagem fitoquímica e composição bromatológica de *Mimosa tenuiflora* (Willd) Poiret e *Piptadenia stipulacea* (Benth) Ducke**. 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia – Sistemas Agrossilvipastoris no Semi-Árido) – Universidade Federal de Campina Grande, Patos, 2008.

BEZERRA, D. A. C. et al. Abordagem fitoquímica, composição bromatológica e atividade antibacteriana de *Mimosa tenuiflora* (Wild) Poiret e *Piptadenia stipulacea* (Benth) Ducke. **Acta Scientiarum. Biological Sciences**, v. 33, n. 1, p. 99-106, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/actascibiolsci.v33i1.5366>. Acesso em: 23 maio 2025.

BEZERRA, S. A.; CANTALICE, J. R. B.; TARQUI, J. L. Z. Características do escoamento superficial e taxas de erosão em uma área sob cultivo agrícola. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 5., 2002, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ABRH, 2002. p. 403-411.

BEZERRA, N. F. **Água e desenvolvimento sustentável no semiárido**. Fortaleza: Fundação Konrad Adenauer, 2002. (Série Debates, 24).

BFG. Growing knowledge: an overview of Seed Plant diversity in Brazil. **Rodriguésia**, v. 66, n. 4, p. 1085-1113, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-7860201566411>. Acesso em: 23 maio 2025.

BORGES, K. F.; AZEVEDO, M. A. M. Inventário florístico de um remanescente de Floresta Estacional Semidecidual no Sul do Espírito Santo, Brasil: Parque Estadual Cachoeira da Fumaça. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 68, n. 5, p. 1963-1976, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2175-7860201768527>. Acesso em: 23 maio 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes (RAS): Cap. 14: Análise de espécies florestais**. Revisão 1. Brasília: MAPA, 2025. Disponível em: <https://wikisda.agricultura.gov.br/>. Acesso em: 4 ago. 2025.

BRITO, D. R. B. et al. Caracterização bromatológica das folhas da *Mimosa caesalpinhiifolia* Benth (sabiá) no estado do Maranhão, Brasil. In: **Alimentos e Alimentação Animal**. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2021. p. 25-40.

CASTILLO, J. A.; SMITH-RAMÍREZ, C.; CLARAMUNT, V. Differences in stakeholder perceptions about native forest: implications for developing a restoration program. **Restoration Ecology**, v. 29, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.13293>. Acesso em: 23 maio 2025.

ÇETINKAYA, N.; PAZARLAR, S.; PAYLAN, İ. C. Ozone treatment inactivates common bacteria and fungi associated with selected crop seeds and ornamental bulbs. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 29, n. 12, p. 103480, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.103480>. Acesso em: 23 maio 2025.

CHAWLA, A.; BELL, J. W.; JANES, M. E. Optimization of ozonated water treatment of wild-caught and mechanically peeled shrimp meat. **Journal of Aquatic Food Product Technology**, v. 16, n. 2, p. 41-56, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1300/j030v16n02_05. Acesso em: 23 maio 2025.

CHIBANTE, L. P. F.; HEYMANN, D. On the geochemistry of fullerenes: stability of C60 in ambient air and the role of ozone. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, n. 8, p. 1879-1881, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90119-h](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90119-h). Acesso em: 23 maio 2025.

CIRIO, G. M.; LIMA, M. L. R. Z. C. Métodos de detecção do gênero *Aspergillus* em sementes de milho (*Zea mays* L.) em 270 dias de armazenamento. **Visão Acadêmica**, v. 4, n. 1, 2003.

DAVIDE, A. C.; FARIA, J. M. R.; BOTELHO, S. A. **Propagação de espécies florestais**. Belo Horizonte: CEMIG/UFLA/FAEPE; Lavras: UFLA, 1995.

DELL'OLMO, E.; TIBERINI, A.; SIGILLO, L. Leguminous seedborne pathogens: Seed health and sustainable crop management. **Plants**, v. 12, n. 10, p. 2040, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/plants12102040>. Acesso em: 23 maio 2025.

EPELLE, E. I. et al. Ozone application in different industries: A review of recent developments and prospects. **Chemical Engineering Journal**, v. 454, Part 2, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140188>. Acesso em: 23 maio 2025.

FERNANDES, M. F.; QUEIROZ, L. P. Vegetação e flora da Caatinga. **Ciência e Cultura**, v. 70, n. 4, p. 51-56, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602018000400014>. Acesso em: 23 maio 2025.

FRISCHIE, S.; AFFLECK, D.; DIXON, K. Ensuring seed quality in ecological restoration: native seed cleaning and quality testing. **Restoration Ecology**, v. 28, n. S3, p. S414-S424, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.1321>. Acesso em: 23 maio 2025.

FOWLER, J. A. P.; MARTINS, E. G. **Manejo de sementes de espécies florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2001. 76 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 58). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/289390/1/doc58.pdf>. Acesso em: 23 maio 2025.

FOX, J.; WEISBERG, S. **An R Companion to Applied Regression**. 3. ed. Thousand Oaks: Sage, 2019.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, Rockville, v. 17, n. 7, p. 1866-1875, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1105/tpc.105.033589>. Acesso em: 23 maio 2025.

GUIMARÃES, Z. T. M.; DA SILVA, D. C.; FERREIRA, M. J. Seedling quality and short-term field performance of three Amazonian forest species as affected by site conditions. **IForest: Biogeosciences and Forestry**, v. 17, n. 2, p. 80-89, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3832/ifor4317-016>. Acesso em: 23 maio 2025.

GRAHAM, D. M. Use of ozone for food processing. **Food Technology**, v. 51, n. 6, p. 72-75, 1997.

GRAVES, S. et al. **multcompView: Visualizations of paired comparisons**. R package version 0.1-8, 2015. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=multcompView>. Acesso em: 12 maio 2025.

GUZEL-SEYDIM, Z. B.; GREENE, A. K.; SEYDIM, A. C. Use of ozone in the food industry. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v. 37, n. 4, p. 453-460, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2003.10.014>. Acesso em: 23 maio 2025.

HARTIG, F. **DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models**. R package version 0.4.6, 2022. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=DHARMA>. Acesso em: 12 maio 2025.

- HOTHORN, T.; BRETZ, F.; WESTFALL, P. Simultaneous inference in general parametric models. **Biometrical Journal**, v. 50, n. 3, p. 346-363, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/bimj.200810425>. Acesso em: 23 maio 2025.
- KANG, M. H. et al. Differential inactivation of fungal spores in water and on seeds by ozone and arc discharge plasma. **PLoS One**, v. 10, n. 9, p. e0139263, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139263>. Acesso em: 23 maio 2025.
- KASSAMBARA, A. **ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots**. R package version 0.6.0, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=ggpubr>. Acesso em: 12 maio 2025.
- KELLS, S. A. et al. Efficacy and fumigation characteristics of ozone in stored maize. **Journal of Stored Products Research**, v. 37, p. 371-383, 2001.
- KHADRE, M. A.; YOUSEF, A. E.; KIM, J.-G. Microbiological aspects of ozone applications in food: a review. **Journal of Food Science**, v. 66, n. 9, p. 1242-1252, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2001.tb15196.x>. Acesso em: 23 maio 2025.
- KIM, J.-G.; YOUSEF, A. E.; DAVE, S. Application of ozone for enhancing the microbiological safety and quality of foods: a review. **Journal of Food Protection**, v. 62, n. 9, p. 1071-1087, 1999. Disponível em: <https://doi.org/10.4315/0362-028x-62.9.1071>. Acesso em: 23 maio 2025.
- LAPOLLI, F. R. et al. Desinfecção de efluentes sanitários por meio da ozonização. In: _____. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2003. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/060d3863-61cc-4b78-8000-61d05747a17b/Piveli-2003-Desinfeccao.pdf>. Acesso em: 20 maio 2025.
- LAZAROTTO, M.; MUNIZ, M. F. B.; SANTOS, A. F. Detecção, transmissão, patogenicidade e controle químico de fungos em sementes de paineira (*Ceiba speciosa*). **Summa Phytopathologica**, Botucatu, v. 36, p. 105-112, 2010.
- LEMIC, D. et al. Ozone treatment as a sustainable alternative for suppressing blue mold in mandarins and extending shelf life. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p. 1196, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071196>. Acesso em: 23 maio 2025.
- LENTH, R. V. **emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means**. R package version 1.8.8, 2023. Disponível em: <https://cran.r-project.org/package=emmeans>. Acesso em: 12 maio 2025.
- LEWIS, G. P. et al. **Legumes of the world**. Kew: The Royal Botanic Gardens, 2005.
- LEVENE, H. Robust tests for equality of variances. In: OLKIN, I. et al. (ed.). **Contributions to Probability and Statistics: Essays in Honor of Harold Hotelling**. Stanford: Stanford University Press, 1960. p. 278-292.
- LIMA, P. C. F.; CAVALCANTE, A. M. B.; LIMA, J. L. S. Produção de mudas de sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.) em diferentes volumes de recipientes e níveis de sombreamento. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 28, n. 5, p. 701-709, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622004000500004>. Acesso em: 23 maio 2025.

- LISBÔA-PADULLA, T. et al. Detecção de fungos em sementes de pau-brasil (*Caesalpinia echinata*) coletadas durante sua formação e dispersão. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 32, p. 154-159, 2010.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 1992. 352 p.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2000. v. 1, 368 p.
- LPWG – The Legume Phylogeny Working Group. A new subfamily classification of the Leguminosae based on a taxonomically comprehensive phylogeny. **Taxon**, v. 66, n. 1, p. 44-77, 2017.
- MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. São Paulo: D & Z Computação Gráfica e Editora, 2004. 413 p.
- MAIA, G. N. **Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades**. 2. ed. Fortaleza: Printcolor Gráfica e Editora, 2012. 413 p.
- MACHADO, J. C. **Tratamento de sementes: fundamentos e aplicações**. Brasília: MEC-ESAL-FAEPE, 1988. 106 p.
- MATŁOK, N. et al. Modification of fungicide treatment needs and antioxidant content as a result of real-time ozonation of raspberry plants. **Molecules (Basel, Switzerland)**, v. 29, n. 16, p. 3949, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules29163949>. Acesso em: 23 maio 2025.
- MARIANO, N.; HONÓRIO DE AQUINO, M. D.; FERRAREZI JUNIOR, E. A importância da recuperação de áreas degradadas: uma forma de conservação ambiental. **Revista Interface Tecnológica**, v. 19, n. 1, p. 185-197, 2022.
- MURPHY, P. G.; LUGO, A. E. Ecology of Tropical Dry Forests. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 17, p. 67-88, 1986.
- MAXIMIANO, C. V. et al. Physiological and sanitary quality of maize seeds preconditioned in ozonated water. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 360-365, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/gmgDgGdTmtSyZBQvz6SrLLK/>. Acesso em: 23 maio 2025.
- MCCULLAGH, P.; NELDER, J. A. **Generalized Linear Models**. 2. ed. London: Chapman & Hall, 1989.
- MELO, C. E. L. D. **Ozonização de sementes de feijão comum: qualidade fisiológica, atividade enzimática, desempenho em campo e detecção de alterações bioquímicas por espectroscopia no infravermelho próximo**. 2023. 78 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2023. Disponível em: <https://locus.ufv.br/handle/123456789/31578>. Acesso em: 23 maio 2025.

- MELO, J. O. et al. A Caatinga: Um bioma exclusivamente brasileiro. **Ciência e Cultura**, v. 75, n. 4, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5935/2317-6660.20230048>. Acesso em: 23 maio 2025.
- MENTEN, J.O.M. Prejuízos causados por patógenos associados às sementes. In: MENTEN, J.O.M. (Ed.). **Patógenos em sementes: detecção, danos e controle químico**. Piracicaba: ESALQ/FEALQ. 1991. p.115-136.
- MENTEN, J. O. M. et al. **Patologia de sementes**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 480 p.
- MONTEIRO JÚNIOR, J. J. et al. Análise da simulação de cenários em Florestas Secas – Pernambuco, Brasil. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE MENSURAÇÃO FLORESTAL, 4., 2018, Recife. **Anais [...]**. Recife: [s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/329783349>. Acesso em: 22 out. 2025.
- NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. In: KRZYZANOWSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p. 2.1-2.24.
- NASCIMENTO, M. G. R. et al. Isolamento de fungos fitopatogênicos em sementes da árvore Caatinga. **Revista De La Facultad De Agronomía**, v. 116, n. 2, 2017.
- NORMOV, D. et al. Does ozone treatment of maize seeds influence their germination and growth energy? **Acta Agriculturae Slovenica**, Ljubljana, v. 114, n. 2, p. 251-258, 2019. Disponível em: <https://journals.uni-lj.si/aas/article/view/12886>. Acesso em: 22 out. 2025.
- NOVAK, J. S. Aumento da inativação de células vegetativas e esporos de *Clostridium perfringens* tratados com ozônio em superfícies de carne bovina fabricadas usando calor moderado. **Journal of Food Protection**, v. 67, n. 2, p. 342-346, 2004.
- NOUTCHEU, R. et al. Coppicing as a driver of plant resprouting and the regeneration of a Caatinga dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 529, n. 120736, p. 120736, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120736>. Acesso em: 23 maio 2025.
- NOY-MEIR, I. Ecossistemas desérticos: meio ambiente e produtores. **Revisões Anuais Ecologia**, 1973.
- OLIVEIRA, A. R. M.; WOSCH, C. L. Ozonólise: a busca por um mecanismo. **Química Nova**, v. 35, n. 7, p. 1482-1485, 2012.
- OLIVEIRA, R. V. et al. Ozone in health treatment and effect on the physiological and biochemical quality of pepper seeds. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p. 14856-14871, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n2-216>. Acesso em: 23 maio 2025.
- OLIVEIRA-FILHO, A. T.; JARENKOW, J. A.; RODAL, M. J. Relações Florísticas de Florestas Estacionais Secas do Leste da América do Sul com Base em Padrões de Distribuição de Espécies Arbóreas. In: PENNINGTON, R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER, J. A. **Savanas Neotropicais e Florestas Estacionais Secas**. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2006. p. 159-192.

OLIVEIRA, R. A. M. **Investigação dos extrativos da madeira de espécies da Caatinga visando à obtenção de compostos bioativos**. 2023. 29 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Florestal) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2023.

PANDISELVAM, R. et al. Application and kinetics of ozone in food preservation. **Ozone: Science & Engineering**, v. 39, n. 2, p. 115-126, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1268947>. Acesso em: 23 maio 2025.

PANDISELVAM, R. et al. Impact of ozone treatment on seed germination: A systematic review. **Ozone: Science & Engineering**, v. 42, n. 4, p. 331-346, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01919512.2019.1673697>. Acesso em: 23 maio 2025.

PANDISELVAM, R. et al. Numerical simulation and validation of ozone concentration profile in green gram (*Vigna radiata*) bulks. **Ozone: Science & Engineering**, v. 39, n. 1, p. 54-60, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1244641>. Acesso em: 23 maio 2025.

PARISI, J. J. D. et al. Patologia de sementes florestais: danos, detecção e controle, uma revisão. **Summa Phytopathologica**, v. 45, n. 2, p. 129-133, 2019.

PIACENTINI, K. C.; SAVI, G. D.; SCUSSEL, V. M. The effect of ozone treatment on species of *Fusarium* growth in malting barley (*Hordeum vulgare* L.) grains. **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, v. 9, n. 4, p. 383-389, 2017.

PIO, A. D. et al. Padrões florístico-estruturais, riqueza e diversidade de Florestas Estacionais Semidecíduais no Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 3, p. e69612, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509869612>. Acesso em: 23 maio 2025.

QUEIROZ, L. P. **Leguminosas da Caatinga**. Bahia: Universidade Estadual de Feira de Santana, 2009. 914 p.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2024. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em: 12 maio 2025.

RICARDO, S. D. F.; COE, H. H. G.; DIAS, R. R. Reference collection of plant phytoliths from the Caatinga biome, Northeast Brazil. **Flora**, v. 249, p. 1-8, 2018.

RICE, R. G.; GRAHAM, D. M. Recent developments in food and agriculture uses of ozone. In: ANNUAL CONFERENCE - OZONE APPLICATIONS IN A CHANGING REGULATORY ENVIRONMENT – IOA, 2002, Raleigh, North Carolina. **Proceedings [...]**. Raleigh, North Carolina: IOA, 2002. p. 1-12.

RODRIGUES, V. O. et al. Treating sunflower seeds subjected to ozonization. **Journal of Seed Science**, v. 37, n. 3, p. 202-210, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-1545v37n3148582>. Acesso em: 23 maio 2025.

RODRIGUES, V. O. et al. Ozônio no tratamento sanitário e efeito na qualidade fisiológica e bioquímica de sementes de pimentão. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 2, p.

14856-14871, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n2-216>. Acesso em: 23 maio 2025.

ROSÁRIO, W. C. et al. Fisiologia, sanidade e controle de fitopatógenos em sementes florestais da Reserva Extrativista Quilombo do Frechal em Mirinzal - MA. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 2, p. 959-978, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/1980509864510>. Acesso em: 6 ago. 2025.

SANTOS, R. F. et al. Propriedades antimicrobianas de extratos da casca de jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Wild.) Poir.). **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 16915-16930, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n3-09>. Acesso em: 23 maio 2025.

SANTOS, A. F.; PARISI, J. J. D. Doenças em mudas e tipos de associações entre fungos e sementes florestais. In: SANTOS, A. F.; PARISI, J. J. D.; MENTEN, J. O. M. **Patologia de sementes florestais**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. p. 37-48.

SAVI, G. D. et al. Aplicação de ozônio no controle de patógenos em sementes. **Revista de Pesquisa em Produtos Armazenados**, v. 87, n. 1, 2016.

SAVI, G. D. et al. Application of ozone on rice storage: A mathematical modeling of the ozone spread, effects in the decontamination of filamentous fungi and quality attributes. **Journal of Stored Products Research**, v. 87, n. 101605, p. 101605, 2020.

SAVI, G. D.; PIACENTINI, K. C.; SCUSSEL, V. M. Ozone Treatment Efficiency on Fungi and Mycotoxins. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 39, p. 940-948, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfpp.12307>. Acesso em: 23 maio 2025.

SAVI, G. D.; SCUSSEL, V. M. Effects of ozone gas exposure on toxigenic fungi species from *Fusarium*, *Aspergillus*, and *Penicillium* genera. **Ozone: Science & Engineering**, v. 36, p. 144-152, 2014.

SHARMA, Y. K.; DAVIS, K. R. The effects of ozone on antioxidant responses in plants. **Free Radical Biology and Medicine**, New York, v. 23, n. 3, p. 480-488, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(97\)00094-0](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(97)00094-0). Acesso em: 23 maio 2025.

SIMPLÍCIO, I. B. O. et al. O uso do ozônio nas superfícies: revisão integrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, v. 36, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.37689/acta-ape/2023ar00542>. Acesso em: 23 maio 2025.

SILVA, I. N. B. et al. Produção de mudas florestais, uma descrição da fava-tamboril. In: **Open Science Research XVIII**. [S.l.]: Editora Científica Digital, 2025. p. 601-613. Disponível em: <https://doi.org/10.37885/250218849>. Acesso em: 23 maio 2025.

SITOE, E. P. E. et al. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110238>. Acesso em: 23 maio 2025.

SPANOGHE, M. et al. Industrial-scale malting barley (*Hordeum vulgare* L.) seed disinfection by fog of ozonated water application. **Ozone: Science & Engineering**, v. 38, n. 2, p. 115-123, 2016.

- SUDHAKAR, N. et al. Assessing influence of ozone in tomato seed dormancy alleviation. **American Journal of Plant Sciences**, v. 2, n. 3, p. 443-448, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ajps.2011.23051>. Acesso em: 23 maio 2025.
- UZOMA, S. et al. Association between low-temperature drying and ozonation processes to control pests and preserve maize quality. **Food Control**, v. 156, p. 110119, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110119>. Acesso em: 23 maio 2025.
- VIOLLEAU, F. et al. Effect of oxidative treatment on corn seed germination kinetics. **Ozone: Science and Engineering**, v. 30, n. 6, p. 418-422, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01919510802474631>. Acesso em: 23 maio 2025.
- VOLTOLINI, T. V. et al. Alternativas alimentares e sistemas de produção animal no semiárido brasileiro. In: SILVA, P. C. G.; MOURA, M. S. B. (org.). **Semiárido Brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. p. 199-242.
- WETZEL, M. V. S. **Patologia de sementes**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 480 p.
- WICKHAM, H. et al. Welcome to the tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.21105/joss.01686>. Acesso em: 23 maio 2025.
- WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. 2. ed. New York: Springer, 2016.
- WU, J.; DOAN, H.; CUENCA, M. A. Investigation of gaseous ozone as an anti-fungal fumigant for stored wheat. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 81, p. 1288-1293, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jctb.1550>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ZHANG, L. et al. Preservation of fresh-cut celery by treatment of ozonated water. **Food Control**, v. 16, n. 3, p. 279-283, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2004.03.007>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ZHU, F. Effect of ozone treatment on the quality of grain products. **Food Chemistry**, v. 264, p. 358-366, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.05.047>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ZHUANG, K. et al. Effect of different ozone treatments on the degradation of deoxynivalenol and flour quality in Fusarium-contaminated wheat. **CyTA - Journal of Food**, v. 18, n. 1, p. 776-784, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1849406>. Acesso em: 23 maio 2025.
- ZUUR, A. F. et al. **Mixed Effects Models and Extensions in Ecology with R**. New York: Springer, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-87458-6>. Acesso em: 23 maio 2025.