



MARÍLIA MENDES DOS SANTOS GUARALDO

**USO DE ÁCIDO ORGÂNICO FORTE EM ALTERNATIVA AO
ÁCIDO SULFÚRICO PARA O DESLINTAMENTO DE
SEMENTES DE ALGODÃO**

**LAVRAS – MG
2026**

MARÍLIA MENDES DOS SANTOS GUARALDO

**USO DE ÁCIDO ORGÂNICO FORTE EM ALTERNATIVA AO ÁCIDO SULFÚRICO
PARA O DESLINTAMENTO DE SEMENTES DE ALGODÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutora.

Prof. (a) Dra. Heloisa Oliveira dos Santos
Orientadora

Prof. Dr. Rafael Peron Castro
Coorientador

**LAVRAS – MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Guaraldo, Marília Mendes dos Santos.

Uso de ácido orgânico forte em alternativa ao ácido sulfúrico para o
deslincamento de sementes de algodão / Marília Mendes dos Santos Guaraldo. - 2026.
77 p. : il.

Orientadora: Heloisa Oliveira dos Santos

Coorientador: Rafael Peron Castro

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2026.

Bibliografia.

1. Gossypium hirsutum L.. 2. Ácido metanossulfônico.. 3. Qualidade de sementes..
4. Espécies reativas de oxigênio.. 5. Estresse oxidativo.. I. Santos, Heloisa Oliveira
dos. II. Castro, Rafael Peron. III. Universidade Federal de Lavras. IV. Título.

MARÍLIA MENDES DOS SANTOS GUARALDO

**USO DE ÁCIDO ORGÂNICO FORTE EM ALTERNATIVA AO ÁCIDO SULFÚRICO
PARA O DESLINTAMENTO DE SEMENTES DE ALGODÃO**

**EVALUATION OF A STRONG ORGANIC ACID AS AN ALTERNATIVE TO
SULFURIC ACID FOR CHEMICAL DELINTING OF COTTON SEEDS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutora.

APROVADA em 03 de fevereiro de 2026.

Dr. Rafael Peron Castro

UFLA

Dra. Christiane Augusta Diniz Melo

UFLA

Dr. Wilson Vicente Souza Pereira

UFPI

Dr. Iolanda Vilela Von Pinho

BAYER SA

Prof. (a) Dra. Heloisa Oliveira dos Santos

Orientadora

Prof. Dr. Rafael Peron Castro

Coorientador

**LAVRAS – MG
2026**

À minha mãe,

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me guiar, acalmar e proteger.

Ao meu pai, Marco Aurélio, por ser aconchego, colo e amparo nos dias difíceis, por acreditar em mim e não medir esforços para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha mãe, Maria Christina (*in memoriam*), que onde quer que esteja, sei que olha por mim.

Ao meu irmão, Matheus, que mesmo distante nunca deixou de se fazer presente, por todo o apoio, cuidado e atenção.

Aos meus afilhados Anna Carolina e Octávio, por toda a amizade, carinho, ajuda e companhia em todos esses anos.

À minha amiga, Thalita, que por acaso entrou na minha vida e, não por acaso, nela permaneceu.

Aos meus amigos de pós-graduação, em especial, o José Victor Maurício de Jesus, o Pedro Henrique Gomes Bezerra e a Giulyana Isabele Silva Tavares, pela amizade, parceria e acolhimento.

À minha orientadora Profa. Dra. Heloisa Oliveira dos Santos, pela confiança, competência, compreensão e pelo conhecimento compartilhado. Por ir além do âmbito acadêmico, mostrando sua integridade, empatia e humanidade.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Rafael Peron Castro, sempre tão solícito, pelo profissionalismo e dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

À banca avaliadora, Profa. Dra. Christiane Augusta Diniz Melo, Prof. Dr. Wilson Vicente Souza Pereira e Dra. Iolanda Vilela Von Pinho, pela atenção, disponibilidade, confiança e sugestões no trabalho.

Aos funcionários e técnicos do Laboratório de Análise de Sementes (LAS), em especial a Jaqueline Pereira Januario, pelo auxílio durante a condução do experimento.

Aos professores que contribuíram para a minha formação.

À Cooperativa dos Produtores Rurais de Catuti (COOPERCAT), em nome do Sr. José Tibúrcio de Carvalho Filho, pela disponibilização das sementes utilizadas na pesquisa, e à Associação Mineira dos Produtores de Algodão (AMIPA).

À Universidade Federal de Lavras – UFLA, ao Departamento de Agricultura, em especial ao Setor de Sementes, pela estrutura oferecida e pela oportunidade de realização do Doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) – projeto APQ 00496-24, pelo financiamento que tornou possível a realização desse projeto.

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

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que eu conseguisse concluir essa importante etapa da minha vida.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO GERAL

A cotonicultura possui relevância estratégica no cenário agroindustrial global, sendo o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) a principal fibra natural da indústria têxtil. A produção mundial apresenta elevada complexidade e forte influência de fatores climáticos, tecnológicos e econômicos, refletindo-se em oscilações de área, produtividade e fluxos comerciais. Ao longo dos anos, o Brasil consolidou-se como um dos principais produtores e exportadores de algodão em pluma, sustentado por sistemas produtivos altamente tecnificados, ganhos expressivos de produtividade e forte integração logística, mantendo posição de destaque no comércio internacional. Além da fibra, a qualidade das sementes constitui fator determinante para o desempenho da cultura, sendo diretamente influenciada pelos processos de beneficiamento pós-colheita. O deslintamento é etapa essencial e obrigatória na produção de sementes de algodão no Brasil, pois remove o línter aderido ao tegumento, favorecendo a semeadura mecanizada, o tratamento químico e o armazenamento. O método químico, tradicionalmente realizado com ácido sulfúrico, é amplamente utilizado pela elevada eficiência, porém apresenta limitações relacionadas à corrosividade, riscos operacionais, impactos ambientais e possíveis prejuízos à germinação e ao vigor das sementes. Diante dessas restrições, torna-se necessário avaliar alternativas mais seguras e ambientalmente adequadas, e nesse contexto, o ácido metanossulfônico (MS) surge como opção promissora por apresentar menor corrosividade, maior segurança operacional e biodegradabilidade, mantendo potencial para eficiência no deslintamento. Assim, o presente estudo teve por objetivo avaliar o uso do MS como alternativa ao ácido sulfúrico no deslintamento de sementes de algodão, considerando diferentes volumes de ácido e tempos de revolvimento, bem como seus efeitos sobre a qualidade fisiológica das sementes. Ainda nesse contexto, avaliou-se as respostas bioquímicas, fisiológicas e estruturais de sementes de algodão submetidas ao deslintamento químico com ácido sulfúrico e MS, por meio da análise de marcadores de estresse oxidativo, da atividade do sistema antioxidante, do desempenho germinativo e da caracterização da superfície do tegumento.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum* L.; ácido metanossulfônico; qualidade de sementes; espécies reativas de oxigênio, estresse oxidativo.

GENERAL ABSTRACT

Cotton farming has strategic relevance in the global agro-industrial scenario, with cotton (*Gossypium hirsutum* L.) being the main natural fiber of the textile industry. World production presents high complexity and strong influence of climatic, technological and economic factors, reflected in oscillations in area, productivity and trade flows. Over the years, Brazil has consolidated itself as one of the main producers and exporters of cotton lint, supported by highly technical production systems, significant productivity gains and strong logistics integration, maintaining a prominent position in international trade. In addition to fiber, seed quality is a determining factor for crop performance, being directly influenced by post-harvest processing processes. Delinting is an essential and mandatory step in the production of cotton seeds in Brazil, as it removes the lint adhered to the seed coat, favoring mechanized sowing, chemical treatment and storage. The chemical method, traditionally performed with sulfuric acid, is widely used for its high efficiency, but it has limitations related to corrosivity, operational risks, environmental impacts and possible damage to germination and seed vigor. In view of these restrictions, it is necessary to evaluate safer and more environmentally appropriate alternatives, and in this context, methanesulfonic acid (MS) emerges as a promising option because it presents lower corrosivity, greater operational safety and biodegradability, maintaining potential for efficiency in delinting. Thus, the present study aimed to evaluate the use of DM as an alternative to sulfuric acid in the delinting of cotton seeds, considering different acid volumes and turning times, as well as its effects on the physiological quality of the seeds. The use of image analysis as a tool for classifying the percentage of delintation with DM was also evaluated, aiming to contribute to technical, environmental and operational advances in the cotton seed production chain. Also in this context, the biochemical, physiological and structural responses of cotton seeds submitted to chemical delintation with sulfuric acid and DM were evaluated, through the analysis of oxidative stress markers, the activity of the antioxidant system, the germination performance and the characterization of the surface of the seed coat.

Keywords: *Gossypium hirsutum* L.; methanesulfonic acid; seed quality; reactive oxygen species, oxidative stress.

INDICADORES DE IMPACTO

O deslintamento químico é uma etapa fundamental no processo de beneficiamento de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.), visando aprimorar a eficiência da semeadura, uniformidade de germinação e o desempenho fisiológico das sementes. Tal processo é realizado com ácido sulfúrico concentrado, uma substância altamente corrosiva e oxidante, estando associada a riscos operacionais, ambientais e potenciais danos à qualidade das sementes. Sendo assim, objetivou-se avaliar o uso do ácido metanossulfônico como alternativa ao uso do ácido sulfúrico no processo de deslintamento de sementes de algodão. A substituição do ácido sulfúrico representa um avanço tecnológico significativo, visto que isso possibilita o desenvolvimento de processos de deslintamento mais seguros, com redução do desgaste de equipamentos, menor risco de acidentes operacionais e maior previsibilidade dos resultados, favorecendo a inovação nos sistemas de beneficiamento de sementes de algodão. O uso do ácido metanossulfônico reduzirá custos relacionados à corrosão de maquinários, à necessidade de reposição de peças, ao tratamento de resíduos e à adoção de medidas extremas de segurança ocupacional, além de ser prontamente biodegradável, sendo vantajoso para o meio ambiente, em comparação com o ácido usual. Além disso, a manutenção da qualidade fisiológica das sementes resultará em uma maior eficiência produtiva no campo, refletindo assim no bom estabelecimento das lavouras e maior retorno econômico ao longo da cadeia produtiva. A substituição do ácido sulfúrico por uma alternativa menos agressiva promove avanços na segurança do trabalho, reduzindo a exposição de operadores a substâncias altamente perigosas e minimizando riscos à saúde humana. A adoção de práticas mais sustentáveis fortalece a responsabilidade socioambiental do setor agrícola, atendendo às demandas por processos produtivos mais seguros, éticos e ambientalmente responsáveis. Os resultados obtidos demonstram que o ácido metanossulfônico é eficiente na remoção do linter, com as sementes apresentando desempenho fisiológico semelhante ou superior ao método convencional, desde que o volume de ácido e tempo de revolvimento sejam adequadamente ajustados. Dessa forma, conclui-se que o uso do ácido metanossulfônico configura uma alternativa tecnologicamente viável, economicamente vantajosa e socialmente responsável ao ácido sulfúrico, contribuindo para a modernização, sustentabilidade e segurança dos processos de deslintamento no beneficiamento de sementes de algodão. Nesse contexto, os impactos desta pesquisa estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente ao ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável, ao promover maior eficiência produtiva e qualidade de sementes; ODS 3 – Saúde e Bem-Estar, pela redução da exposição ocupacional a substâncias

perigosas; ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura, ao propor inovação tecnológica no beneficiamento de sementes; ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis, pelo uso de insumos menos agressivos e redução de resíduos; e ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima, ao favorecer práticas mais sustentáveis e ambientalmente responsáveis. Adicionalmente, os impactos podem ser classificados, no âmbito da Política Nacional de Extensão Universitária, nas áreas temáticas 5 – Meio Ambiente, em função da redução de impactos ambientais e uso de substâncias biodegradáveis; 7 – Tecnologia e Produção, pela introdução de inovação tecnológica no setor agrícola; e 6 – Saúde, considerando a melhoria nas condições de trabalho e redução de riscos ocupacionais.

IMPACT INDICATORS

Chemical delinting is a fundamental step in the process of processing cotton seeds (*Gossypium hirsutum* L.), aiming to improve sowing efficiency, germination uniformity and physiological performance of seeds. Such a process is carried out with concentrated sulfuric acid, a highly corrosive and oxidizing substance, and is associated with operational and environmental risks and potential damage to seed quality. Thus, the objective of this study was to evaluate the use of methanesulfonic acid as an alternative to the use of sulfuric acid in the delintation process of cotton seeds. The replacement of sulfuric acid represents a significant technological advance, since it enables the development of safer delinting processes, with reduced wear and tear on equipment, lower risk of operational accidents and greater predictability of results, favoring innovation in cotton seed processing systems. The use of methanesulfonic acid will reduce costs related to machinery corrosion, the need for replacement parts, waste treatment and the adoption of extreme occupational safety measures, in addition to being readily biodegradable, being advantageous for the environment, compared to the usual acid. In addition, maintaining the physiological quality of the seeds will result in greater production efficiency in the field, thus reflecting on the good establishment of crops and greater economic return along the production chain. The replacement of sulfuric acid with a less aggressive alternative promotes advances in occupational safety, reducing the exposure of operators to highly hazardous substances and minimizing risks to human health. The adoption of more sustainable practices strengthens the socio-environmental responsibility of the agricultural sector, meeting the demands for safer, more ethical and environmentally responsible production processes. The results obtained demonstrate that methanesulfonic acid is efficient in removing the linter, with the seeds presenting physiological performance similar to or superior to the conventional method, as long as the acid volume and turning time are properly adjusted. Thus, it is concluded that the use of methanesulfonic acid is a technologically viable, economically advantageous and socially responsible alternative to sulfuric acid, contributing to the modernization, sustainability and safety of delinting processes in the processing of cotton seeds. In this context, the impacts of this research are aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs), especially SDG 2 – Zero Hunger and Sustainable Agriculture, by promoting greater production efficiency and seed quality; SDG 3 – Health and Well-Being, for the reduction of occupational exposure to hazardous substances; SDG 9 – Industry, Innovation and Infrastructure, by proposing technological innovation in seed processing; SDG 12 – Responsible Consumption and Production, through the use of less aggressive inputs and waste reduction; and SDG 13 – Action

Against Global Climate Change, by favoring more sustainable and environmentally responsible practices. Additionally, the impacts can be classified, within the scope of the National Policy for University Extension, in thematic areas 5 – Environment, due to the reduction of environmental impacts and the use of biodegradable substances; 7 – Technology and Production, for the introduction of technological innovation in the agricultural sector; and 6 – Health, considering the improvement in working conditions and reduction of occupational risks.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	14
1	INTRODUÇÃO GERAL	14
	SEGUNDA PARTE	17
	ARTIGO 1 – QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE ALGODÃO DESLINTADAS COM ÁCIDO METANOSSULFÔNICO.....	17
1	INTRODUÇÃO	19
2	MATERIAL E MÉTODOS	21
3	RESULTADOS	23
4	DISCUSSÃO	41
5	CONCLUSÕES.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49
	ARTIGO 2 – ANÁLISE BIOQUÍMICA DE PLÂNTULAS ORIUNDAS DE SEMENTES DE ALGODÃO DESLINTADAS COM ÁCIDO METANOSSULFÔNICO	51
1	INTRODUÇÃO	53
2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	55
3	RESULTADOS	58
4	DISCUSSÃO	69
5	CONCLUSÕES.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73
	TERCEIRA PARTE.....	76
2	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
	REFERÊNCIAS.....	77

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cotonicultura ocupa posição estratégica no sistema agroindustrial, sendo o algodão (*Gossypium hirsutum* L.) a principal fibra natural utilizada pela indústria têxtil mundial. Além de sua relevância econômica, a cultura apresenta forte impacto social, especialmente em países em desenvolvimento, ao gerar empregos diretos e indiretos ao longo de toda a cadeia produtiva (USDA, 2025). A produção de algodão, de forma geral, caracteriza-se por elevada complexidade produtiva, marcada por forte interação entre fatores climáticos, tecnológicos, econômicos e logísticos, refletindo diretamente nas oscilações de área cultivada, produtividade, produção, estoques e fluxos comerciais internacionais (USDA, 2025).

Atualmente, a China segue sendo o maior país produtor de algodão em pluma, seguido da Índia, Brasil e Estados Unidos. Em termos de exportação, espera-se que o Brasil continue na primeira posição do ranking, conquistada na safra 2023/2024, seguido dos Estados Unidos, Austrália e Índia. Já no âmbito da importação, Bangladesh assume o primeiro lugar, seguido do Vietnã, Paquistão e China. (USDA, 2026). A safra global de algodão para 2025/2026 foi estimada em aproximadamente 119,8 milhões de fardos de 480 libras, com consumo mundial em torno de 118,6 milhões de fardos, indicando relativa estabilidade entre oferta e demanda (USDA, 2026). Entretanto, estudos recentes indicam que a produção mundial de algodão nesta safra deverá apresentar ajustes negativos em relação às projeções anteriores, em função de revisões na produtividade e na área cultivada em importantes países produtores, como Índia e Estados Unidos, ainda que o consumo global permaneça elevado, pressionando os estoques finais (USDA, 2026; 2025).

O Brasil consolidou-se como um dos principais protagonistas da cotonicultura mundial nas últimas décadas, destacando-se entre os maiores produtores e exportadores de algodão em pluma. A competitividade brasileira está associada à adoção de sistemas produtivos altamente tecnificados, à expansão da cultura em áreas de Cerrado, majoritariamente realizada em áreas de sequeiro com uso mínimo de irrigação, evidenciando a eficiência e resiliência do setor e à integração com cadeias logísticas eficientes voltadas ao mercado externo (CONAB, 2026). A expansão tecnológica do sistema produtivo brasileiro, associada ao uso intensivo de cultivares melhoradas, manejo fitotécnico avançado e alto nível de mecanização, permitiu expressivos ganhos de produtividade nas últimas décadas (CONAB, 2026).

Na safra 2025/2026, a produção nacional foi estimada em 3,82 milhões de toneladas de pluma, mesmo diante de redução da área cultivada e da produtividade média (CONAB, 2026).

Apesar da redução da área cultivada e da produção nacional de algodão em pluma estimada na safra 2025/2026, atribuídas principalmente à retração dos preços internacionais, ao aumento dos custos de produção e à maior competitividade de outras culturas agrícolas, fatores que influenciam diretamente a tomada de decisão dos produtores, o Brasil mantém posição de destaque no comércio internacional, com exportações estimadas em mais de 3 milhões de toneladas, sustentadas por elevados estoques de passagem e pela forte demanda externa (CONAB, 2026). Esse desempenho reforça a importância do país no abastecimento global de algodão e evidencia o papel estratégico da cotonicultura brasileira não apenas sob a ótica produtiva, mas também como componente essencial da balança comercial do agronegócio nacional (CONAB, 2026). Assim, a compreensão integrada do cenário mundial e nacional da cotonicultura torna-se fundamental para subsidiar análises técnicas, econômicas e estratégicas, especialmente em estudos relacionados à produção, qualidade da fibra e sustentabilidade da cadeia do algodão, incluindo aspectos ligados à produção de sementes, manejo agrônomo e competitividade internacional.

Além da fibra, a cadeia produtiva do algodão apresenta forte dependência da qualidade fisiológica e sanitária das sementes, uma vez que estas constituem o principal insumo do sistema produtivo. A obtenção de esrandes uniformes e vigorosos está diretamente relacionada à qualidade das sementes utilizadas, sendo esta influenciada por aspectos genéticos, ambientais e, sobretudo, pelos processos de beneficiamento pós-colheita (Marcos Filho, 2015). Dentre esses processos, o deslntamento assume papel central, por promover a remoção das fibras curtas que se mantém aderidas ao tegumento, pós-processo de descaroçamento, denominadas línter.

O deslntamento é um processo considerado essencial e obrigatório na produção de sementes de algodão no Brasil, uma vez que, a partir do sancionamento da Lei Federal nº10.711 de 5 de agosto de 2003 (Brasil, 2003), complementada pela Instrução Normativa (IN) MAPA nº 45 de 17 de setembro de 2013 (Brasil, 2013), ficou determinado que as sementes de algodão só podem ser comercializadas sem a presença de línter, ou seja, se estas estiverem deslntadas. A presença do línter compromete a qualidade sanitária das sementes e atrapalha o processo de germinação, uma vez que dificulta a embebição das sementes. Além disso, o deslntamento facilita a semeadura mecanizada, o tratamento químico e o armazenamento das sementes. Os métodos mais conhecidos desse processo são o mecânico, a flambagem e o químico, sendo este último o mais utilizado, por ser mais eficiente do que os demais e facilmente reproduzido em escala comercial.

O deslintamento químico, tradicionalmente realizado com ácido sulfúrico, é amplamente adotado na indústria sementeira por sua elevada eficiência na degradação das fibras celulósicas do línter, proporcionando sementes com superfície mais uniforme e com menor higroscopicidade (Brunetta; Brunetta, 2015). No entanto, o uso desse ácido apresenta limitações de ordem ambiental, operacional e de segurança. A corrosividade do ácido sulfúrico danifica os equipamentos utilizados no processo de deslintamento com o passar do tempo, devido as suas propriedades de oxidação, que são especialmente fortes e, quando acopladas com a tensão térmica e mecânica que é colocada nas sementes de algodão durante o processo de deslintamento, pode reduzir a taxa de germinação de semente. Além disso, o ácido sulfúrico não se biodegrada prontamente, assim também se apresenta como preocupação ambiental o descarte dos resíduos, bem como é altamente tóxico para o operador (Joseph; Kenneth, 2015).

Nesse sentido, usar outros ácidos visando reduzir impactos ambientais, reduzir danos aos maquinários, reduzir riscos ao operador e preservar atributos essenciais como germinação, vigor e longevidade das sementes faz-se necessário. Uma alternativa que aparenta ser viável é a utilização do ácido metanossulfônico para o deslintamento das sementes de algodão. O ácido metanossulfônico não é tão corrosivo quanto o ácido sulfúrico, assim, torna-se mais fácil de ser manuseado e não degrada agressivamente os equipamentos. Além disso, este ácido não volatiliza tão prontamente e não causa a produção de vapores tóxicos e/ou irritantes como o ácido sulfúrico faz durante o processo, fazendo o seu uso ser mais seguro. O ácido metanossulfônico é, ainda, prontamente biodegradável, sendo vantajoso para o meio ambiente, em comparação com o ácido usual (Joseph; Kenneth, 2015).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o uso do ácido metanossulfônico em alternativa ao uso do ácido sulfúrico no deslintamento de sementes de algodão. Para isso, avaliou-se a qualidade fisiológica das sementes de algodão após o processo de deslintamento com diferentes volumes de ácido metanossulfônico e diferentes tempos de revolvimento da mistura: ácido + sementes, em comparação com o método tradicionalmente utilizado. Ainda nesse contexto, avaliou-se as respostas bioquímicas, fisiológicas e estruturais de sementes de algodão submetidas ao deslintamento químico com ácido sulfúrico e MS, por meio da análise de marcadores de estresse oxidativo, da atividade do sistema antioxidante, do desempenho germinativo e da caracterização da superfície do tegumento

SEGUNDA PARTE

ARTIGO 1 – QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE ALGODÃO DESLINTADAS COM ÁCIDO METANOSSULFÔNICO

RESUMO

O deslintamento químico é uma etapa essencial no beneficiamento de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.), pois promove melhorias na semeadura, na uniformidade de germinação e no desempenho fisiológico das sementes. Tradicionalmente, esse processo é realizado com ácido sulfúrico concentrado, substância altamente corrosiva e oxidante, associada a riscos operacionais, ambientais e potenciais danos à qualidade das sementes. Diante desse cenário, objetivou-se avaliar o uso do ácido metanossulfônico, um ácido orgânico forte, como alternativa ao ácido sulfúrico no deslintamento de sementes de algodão, considerando os efeitos sobre a qualidade fisiológica das sementes. Os experimentos foram conduzidos no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes da Universidade Federal de Lavras, utilizando sementes da cultivar DP 1536 B2RF, submetidas a diferentes volumes de ácido metanossulfônico (0,20; 0,28 e 0,36 L kg⁻¹ de sementes) e tempos de revolvimento (14, 21, 28 e 35 minutos), sendo o deslintamento com 0,14 L kg⁻¹ de ácido sulfúrico por 21 minutos utilizado como controle. Após o deslintamento, as sementes foram neutralizadas com hidróxido de cálcio na concentração de 7,2%, lavadas e secas, e avaliadas quanto ao teor de água, germinação, primeira contagem, ocorrência de plântulas normais e anormais, sementes mortas, crescimento inicial, com auxílio de análise de imagens, e massa seca de plântulas. Os resultados demonstraram que o ácido metanossulfônico foi eficiente na remoção do línter. De modo geral, os tratamentos com o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 28 minutos de revolvimento e com o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento mostraram-se mais eficientes no deslintamento de sementes de algodão. Portanto, conclui-se que o ácido metanossulfônico apresenta potencial como alternativa viável ao ácido sulfúrico no deslintamento de sementes de algodão, permitindo eficiência do processo com menor agressividade química, maior segurança operacional e preservação da qualidade fisiológica das sementes, contribuindo para o desenvolvimento de protocolos mais sustentáveis e tecnicamente seguros para a cadeia produtiva do algodão.

Palavras-chave: *Gossypium hirsutum*; deslintamento químico; ácido sulfúrico; beneficiamento de semente.

ABSTRACT

Chemical delinting is an essential step in the processing of cotton seeds (*Gossypium hirsutum* L.), as it promotes improvements in sowing, germination uniformity and physiological performance of the seeds. Traditionally, this process is carried out with concentrated sulfuric acid, a highly corrosive and oxidizing substance, associated with operational and environmental risks and potential damage to seed quality. In view of this scenario, the objective of this study was to evaluate the use of methanesulfonic acid, a strong organic acid, as an alternative to sulfuric acid in the delinting of cotton seeds, considering the efficiency of the process and the effects on the physiological quality of the seeds. The experiments were conducted at the Central Seed Research Laboratory of the Federal University of Lavras, using seeds of the cultivar DP 1536 B2RF, subjected to different volumes of methanesulfonic acid (0.20, 0.28 and 0.36 L kg⁻¹ of seeds) and turning times (14, 21, 28 and 35 minutes), with delinting with sulfuric acid being used as control. After delinting, the seeds were neutralized, washed and dried, and evaluated for water content, germination, first count, occurrence of normal and abnormal seedlings, dead seeds, initial growth and seedling dry mass, with the aid of image analysis. The results showed that methanesulfonic acid was efficient in removing the linter. In general, the treatments with a volume of 0.20 L of methanesulfonic acid per 28 minutes of turning and with a volume of 0.20 L of methanesulfonic acid for 35 minutes of turning proved to be more efficient in the delinting of cotton seeds. Therefore, it is concluded that methanesulfonic acid has potential as a viable alternative to sulfuric acid in the delinting of cotton seeds, allowing process efficiency with less chemical aggressiveness, greater operational safety and preservation of the physiological quality of the seeds, contributing to the development of more sustainable and technically safe protocols for the cotton production chain.

Keywords: *Gossypium hirsutum*; chemical delinting; sulfuric acid; seed processing.

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do algodão apresenta forte dependência da qualidade fisiológica e sanitária das sementes, uma vez que estas constituem o principal insumo do sistema produtivo. A obtenção de estandes uniformes e vigorosos está diretamente relacionada à qualidade das sementes utilizadas, sendo esta influenciada por aspectos genéticos, ambientais e, sobretudo, pelos processos de beneficiamento pós-colheita (Marcos Filho, 2015). Dentre as etapas pós-colheita, o deslintamento assume papel central, por promover a remoção das fibras curtas que se mantêm aderidas ao tegumento, pós-processo de descaroçamento, denominadas linter.

O deslintamento é um processo considerado essencial e obrigatório na produção de sementes de algodão no Brasil, uma vez que, a partir do sancionamento da Lei Federal nº10.711 de 5 de agosto de 2003 (Brasil, 2003), complementada pela Instrução Normativa (IN) MAPA nº45 de 17 de setembro de 2013 (Brasil, 2013), ficou determinado que as sementes de algodão só podem ser comercializadas sem a presença de linter, ou seja, se estas estiverem deslintadas.

O deslintamento químico, realizado com ácido sulfúrico, é amplamente adotado na indústria sementeira por sua elevada eficiência na degradação das fibras celulósicas do linter, proporcionando sementes com superfície mais uniforme e com menor higroscopicidade (Brunetta; Brunetta, 2015). No entanto, o uso desse ácido apresenta limitações de ordem ambiental, operacional e de segurança.

O ácido sulfúrico (H_2SO_4) é um ácido inorgânico forte, amplamente utilizado em processos industriais, laboratoriais e agrícolas. Apresenta elevada força ácida, alta reatividade e forte caráter oxidante, especialmente em concentrações elevadas. Em função dessas propriedades, é altamente corrosivo, o que danifica os equipamentos utilizados no processo de deslintamento com o passar do tempo e prova queimaduras severas quando em contato com a pele. O ácido sulfúrico reage de forma exotérmica em contato com a água, promovendo intensa liberação de calor, o que impõe a adoção de rigorosas medidas de segurança durante o seu manuseio. Ele reage, ainda, de forma vigorosa com materiais orgânicos, promovendo desidratação, carbonização e degradação rápida de tecidos vegetais e materiais fibrosos, além de não se biodegradar prontamente (Joseph; Kenneth, 2015).

Nesse contexto, o ácido metanossulfônico ($\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$) surge como uma alternativa potencial ao deslintamento químico de sementes de algodão. Trata-se de um ácido orgânico forte, caracterizado por elevada acidez, porém menor poder oxidante e menor corrosividade quando comparado ao ácido sulfúrico. É um ácido mais seletivo, termicamente estável, altamente solúvel em água e com menor volatilidade. Em razão de sua menor agressividade

química, apresenta menor potencial de corrosão e menor impacto ambiental, sendo considerado uma alternativa mais segura em processos que demandam controle fino da reação. Em aplicações envolvendo materiais orgânicos, como sementes, tende a promover reações mais controladas, reduzindo riscos excessivos de danos estruturais ou fisiológicos (Joseph; Kenneth, 2015).

Diante desse cenário, objetivou-se avaliar o uso do ácido metanossulfônico, um ácido orgânico forte, como alternativa ao ácido sulfúrico no deslignamento de sementes de algodão, considerando a eficiência do processo e os efeitos sobre a qualidade fisiológica das sementes.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram utilizadas sementes de algodão, com línter, da cultivar DP 1536 B2RF, produzidas e fornecidas pela Cooperativa de Produtores Rurais de Catuti, localizada na cidade de Catuti, região norte do estado de Minas Gerais, na safra 2022/2023.

O deslntamento foi realizado utilizando-se 0,20; 0,28 e 0,36 litros de ácido metanossulfônico por quilograma de sementes com línter, e tempos de revolvimento das sementes com o ácido de 14; 21; 28 e 35 minutos. Sementes deslntadas com 0,14 litros de ácido sulfúrico 98% puro para análise (P.A.) por quilograma de sementes, revolvidas por 21 minutos (Tostes *et al.*, 2023) foram utilizadas como controle (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição da combinação de tratamentos aplicados as sementes de algodão: Sementes deslntadas com ácido sulfúrico, sementes deslntadas com ácido metanossulfônico em diferentes volumes e tempos de revolvimento.

Tratamentos	Volume (L kg ⁻¹)	Tempo (min)
AS	0,14	21
MS	0,36	35
MS	0,36	28
MS	0,36	21
MS	0,36	14
MS	0,28	35
MS	0,28	28
MS	0,28	21
MS	0,28	14
MS	0,20	35
MS	0,20	28
MS	0,20	21
MS	0,20	14

Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Fonte: Da autora (2026).

Para o deslntamento, foi utilizado um protótipo deslntador mecânico de sementes de algodão. As sementes foram pesadas e colocadas no equipamento, e em seguida foi adicionado o ácido, sendo essa mistura revolvida por diferentes tempos, em sistema rotativo automatizado. Após os tempos pré-estabelecidos de revolvimento, foi adicionado à mistura ácido + sementes um litro de solução de hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] na concentração de 7,2% (Tostes *et al.*, 2023), sendo a mistura novamente revolvida no protótipo durante um minuto, com a finalidade

de parar a reação ácida do deslincamento. Em seguida, as sementes foram lavadas em 1 litro de água destilada e colocadas para secar em temperatura ambiente por 24 horas.

O teor de água das sementes foi determinado conforme metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes - RAS (Brasil, 2009), pelo método de estufa a 105 °C.

Para o teste de germinação foram utilizadas oito repetições contendo 25 sementes cada, semeadas sobre duas folhas de papel de germinação, sobrepostas com mais uma folha, as quais foram umedecidas com água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso seco do papel. Os rolos de germinação foram mantidos em germinador tipo Mangelsdorf a 25 °C, com luz constante (Brasil, 2009). A primeira contagem de germinação foi realizada no quarto dia e a última aos sete dias após a semeadura.

Foram realizadas capturas de imagens das plântulas de todos os tratamentos utilizando o equipamento GroundEye S800®, aos quatro e aos sete dias após a montagem do teste de germinação. Foram retiradas do papel de germinação 25 plântulas, sendo cada uma contabilizada como uma repetição, e inseridas na bandeja do módulo de captação para a obtenção das imagens para posterior análise de comprimento de parte aérea, comprimento de raiz e comprimento total.

Foi também determinada a massa seca das plântulas oriundas das sementes deslincadas, aos quatro e aos sete dias após a semeadura. Para isso, foram utilizadas duas repetições de cinco plântulas cada, que foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar, à 68 °C por 24 horas (Brasil, 2009).

O delineamento experimental utilizado foi o delineamento inteiramente casualizado, com 8 repetições de 25 sementes. Foi utilizado o esquema fatorial duplo (3 x 4) + 1, sendo três volumes de ácido metanossulfônico (0,36; 0,28 e 0,20 L kg⁻¹ de semente), quatro tempos de revolvimento da mistura: ácido + sementes (35, 28, 21 e 14 minutos) e o tratamento controle (sementes deslincadas com 0,14 L de ácido sulfúrico por 21 minutos de revolvimento). Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, aplicou-se os testes de médias. Para agrupamento das médias aplicou-se o teste de Scott-knott a 5% de probabilidade (R Core Team, 2024). e, para a comparação dos resultados do tratamento adicional (controle) com os tratamentos resultantes do fatorial duplo, foi realizado o teste de Dunnett a 5% de probabilidade (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS

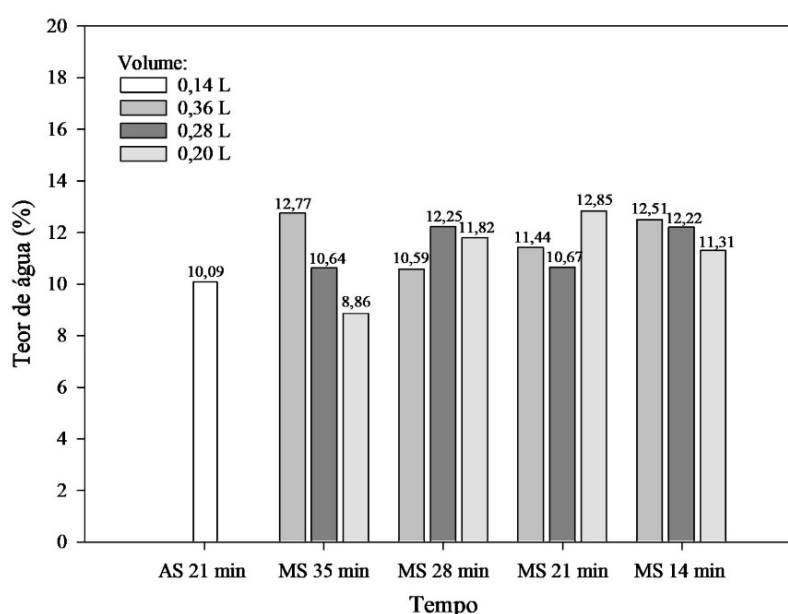
Os teores de água das sementes variaram em função do tempo e do volume de ácido utilizado (Figura 1). No tratamento controle, utilizando-se ácido sulfúrico e tempo de revolvimento de 21 minutos (AS 21 min), observou-se teor de água de 10,09%, valor inferior aos registrados nos demais tratamentos, exceto ao obtido quando da utilização de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento (MS 35 min), que foi de 8,86%. Para os demais volumes de ácido metanossulfônico no tempo de 35 minutos de revolvimento, os teores de água oscilaram entre 10,64% e 12,77%, sendo o maior valor observado no volume de 0,36 L (12,77%).

No tempo de 28 minutos de revolvimento (MS 28 min), os teores de água apresentaram menor amplitude de variação, variando entre 10,59% quando utilizado 0,36 L de ácido metanossulfônico e 12,25% quando utilizado 0,28 L do mesmo ácido.

Para o tempo de revolvimento de 21 minutos (MS 21 min), os teores variaram de 10,67% quando utilizado 0,28 L de ácido a 12,85%, quando utilizado 0,20 L de ácido metanossulfônico (12,85%), sendo este o maior teor de água observado dentre todos os tratamentos.

Já no menor tempo avaliado (MS 14 min), os teores de água variaram entre 11,31%, quando utilizado 0,20 L de ácido e 12,51%, quando utilizado 0,36 L de ácido.

Figura 1 – Porcentagem do teor de água de sementes de algodão após deslintamento químico com ácido sulfúrico e ácido metanossulfônico em diferentes volumes e tempos de revolvimento.

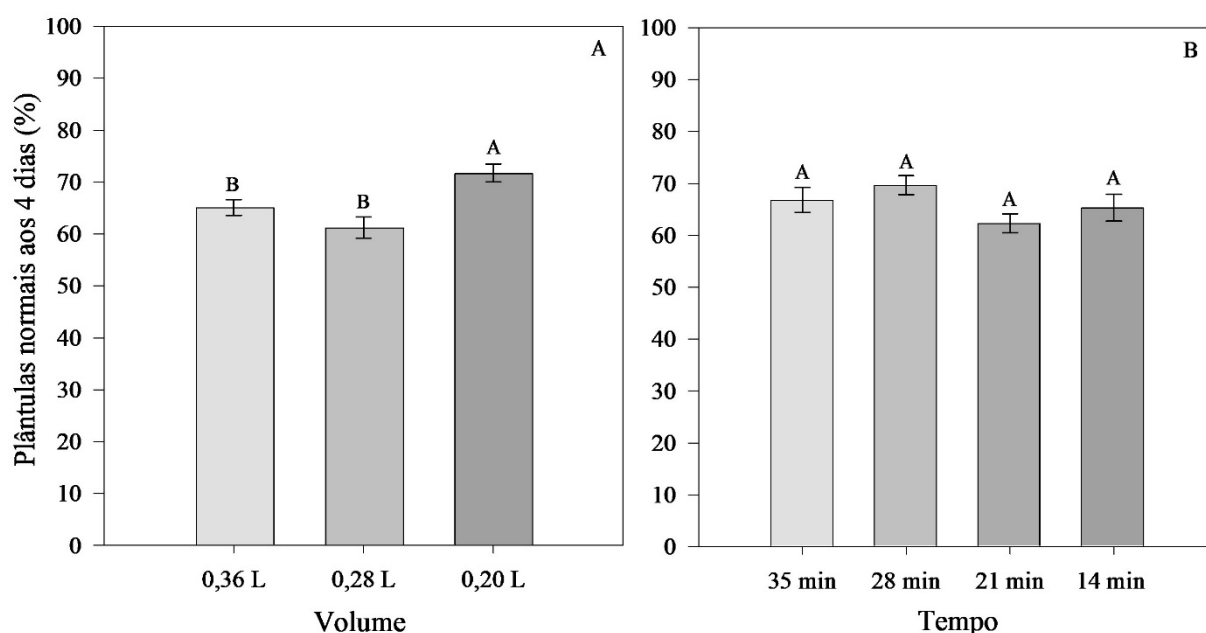


Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Fonte: Da autora (2026).

Para plântulas normais na primeira contagem do teste de germinação, não houve interação entre os fatores: volume de ácido utilizado e tempos de revolvimento das sementes com o ácido. Desta forma, cada fator foi analisado de forma isolada, sendo possível observar que para o fator volume (Figura 2A) o uso de 0,20 L promoveu uma maior porcentagem de plântulas normais, sendo superior aos demais, que foram iguais entre si. Já para o fator tempo de revolvimento (Figura 2B) não houve diferença entre os tratamentos.

Figura 2 – Porcentagem de plântulas normais de algodão avaliadas na primeira contagem do teste de germinação, realizada aos 4 dias após semeadura, em função do volume de ácido metanossulfônico utilizado (A) e do tempo de revolvimento da mistura: ácido + sementes (B).

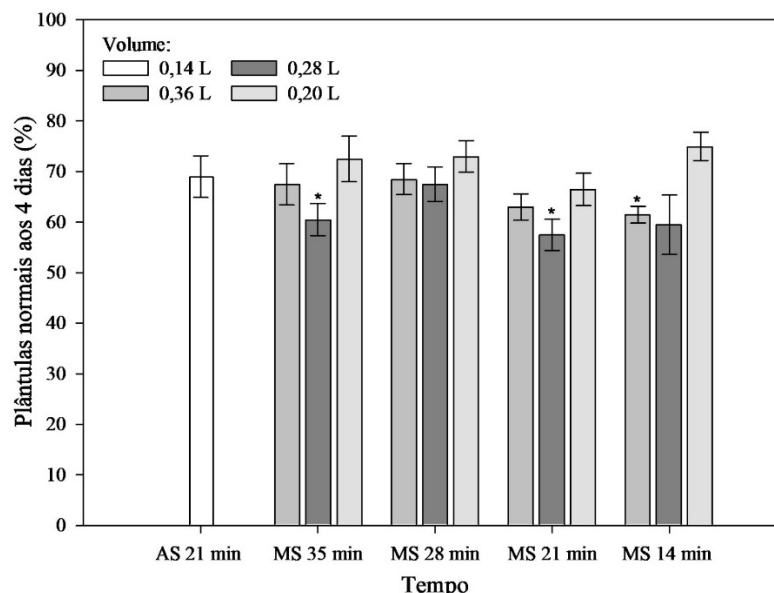


Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Quando da comparação de cada tratamento com o controle para plântulas normais na primeira contagem do teste de germinação (Figura 3), tem-se que o uso de 0,28 L durante 35 e 21 minutos e o uso de 0,20 L durante 14 minutos ocasionou uma menor porcentagem de plântulas normais aos 4 dias após a semeadura.

Figura 3 – Porcentagem de plântulas normais de algodão avaliadas na primeira contagem do teste de germinação, realizada aos 4 dias após sementeira.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Ao analisar a porcentagem de plântulas anormais na primeira contagem de germinação, realizada aos 4 dias após a sementeira (Figura 4A) observou-se que no tempo de revolvimento de 35 minutos, o uso de 0,28 L de ácido metanossulfônico ocasionou maiores resultados do que o uso de 0,36 L que se igualou ao uso de 0,20 L. Para o tempo de 28 e 14 minutos, não houve diferença entre os volumes de ácido utilizado. Já para o tempo de revolvimento de 21 minutos, o uso de 0,20 L de ácido ocasionou maior número de plântulas anormais do que o uso dos demais volumes, que se igualaram entre si. Quando analisados os diferentes tempos dentro de cada volume de ácido utilizado, observou-se que para 0,36 L não houve diferença na porcentagem de plântulas anormais, independente do tempo de revolvimento da mistura ácido + sementes. Para o volume de 0,28 L o tempo de revolvimento de 35 minutos ocasionou uma maior porcentagem de plântulas anormais do que os demais tempos que se igualaram entre si. Já para o volume de 0,20 L de ácido, o tempo de 21 minutos promoveu maiores percentuais que os demais, que também se igualaram entre si.

Ao comparar cada tratamento com o controle, observou-se que apenas os tratamentos utilizando-se 0,20 L de ácido por 35, 28 e 14 minutos e 0,28 L por 21 minutos, igualaram-se com o controle em porcentagem de plântulas anormais aos 4 dias após da sementeira, sendo que

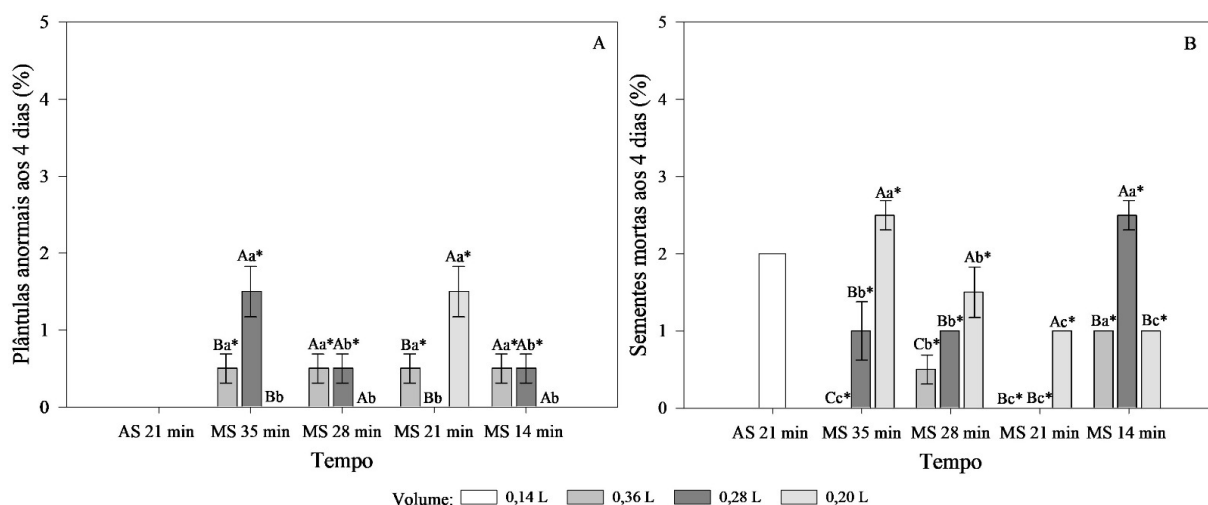
todos os demais tratamentos proporcionaram uma maior porcentagem de plântulas anormais na primeira contagem do teste.

Na Figura 4B estão apresentadas as porcentagens de sementes mortas de algodão contabilizadas na primeira contagem do teste de germinação. Para os tempos de revolvimento de 35 e 28 minutos o uso de 0,20 L de ácido ocasionou maior porcentagem de sementes mortas, seguido do volume de 0,28 L e 0,36 L, respectivamente. Já para o tempo de 21 minutos, o uso de 0,20 L também ocasionou o maior percentual de sementes mortas, porém os demais volumes promoveram o mesmo resultado. Para o menor tempo de revolvimento, o uso de 0,28 L de ácido proporcionou maior número de sementes mortas, e os demais volumes não se diferenciaram entre si. Quando comparados os tempos de revolvimento dentro de cada volume de ácido utilizado, observou-se que para o maior volume utilizado (0,36 L) o menor tempo (14 minutos) promoveu maior número de sementes mortas do que o tempo de 28 minutos, que foi superior ao demais, que se igualaram entre si.

Para o volume intermediário (0,28 L), observou-se resultado semelhante em que o menor tempo de revolvimento proporcionou o maior número de sementes mortas, sendo que este foi superior ao maior tempo, que se igualou aos 28 minutos que, por sua vez, foi superior ao tempo de 21 minutos. Já para a menor dose utilizada, o maior tempo ocasionou o maior percentual de sementes mortas, sendo superior ao tempo de 28 minutos, que foi superior aos demais, que foram iguais entre si.

Quando comparados ao controle, todos os tratamentos apresentaram resultados inferiores ao obtido com o uso de ácido sulfúrico, sendo apenas os tratamentos 0,20 L/35 minutos e o 0,28 L/14 minutos superiores a ele.

Figura 4 – Porcentagem de plântulas anormais (A) e sementes mortas (B) avaliadas na primeira contagem do teste de germinação de sementes de algodão, realizada aos 4 dias após a semeadura.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

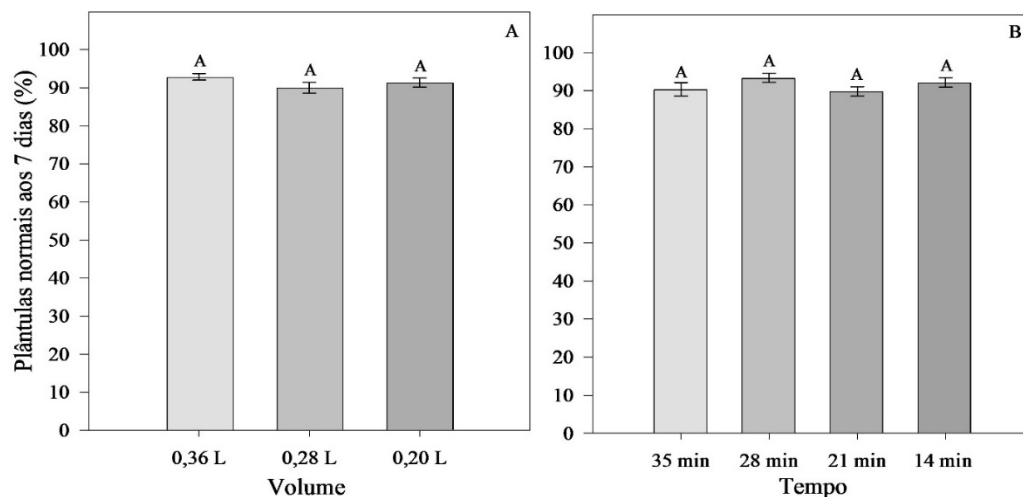
Médias seguidas da mesma letra maiúscula (para volume dentro de tempo) e letra minúscula (para tempo dentro de volume) não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para a porcentagem de plântulas normais avaliadas na contagem final do teste de germinação também não houve interação entre os fatores: volume de ácido utilizado e tempos de revolvimento da mistura sementes + ácido. Sendo assim, cada fator foi analisado de forma isolada. Tanto para o fator volume (Figura 5A) quanto para o fator tempo de revolvimento (Figura 5B) não houve diferença entre os tratamentos.

Figura 5 – Porcentagem de plântulas normais de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após sementeira, em função do volume de ácido metanossulfônico utilizado (A) e do tempo de revolvimento da mistura: ácido + sementes (B).

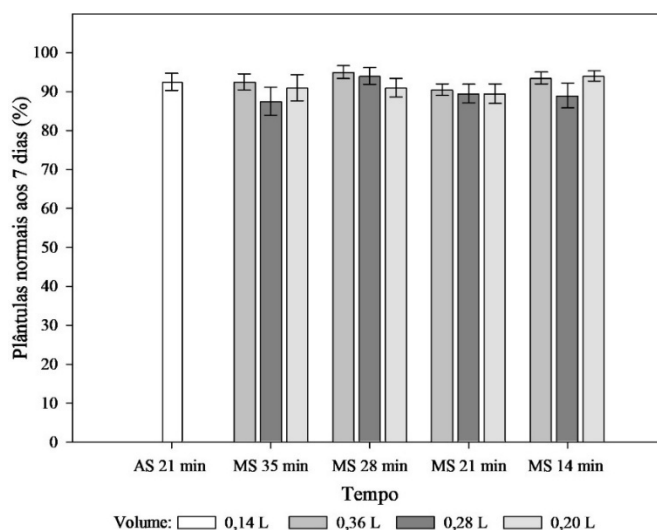


Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Quando comparados cada tratamento com o tratamento controle, observou-se que também não houve diferença significativa entre eles (Figura 6).

Figura 6 – Porcentagem de plântulas normais de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a sementeira.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Na contagem final de germinação, realizada aos 7 dias após a montagem do teste, observou-se que a porcentagem de plântulas anormais (Figura 7A) quando a mistura: ácido + sementes foi revolvida por 35 minutos foi superior quando utilizados 0,28 L de ácido metanossulfônico do que quando utilizados 0,36 L do mesmo ácido que, por sua vez, foi superior do que quando utilizados 0,20 L. Quando o tempo de revolvimento utilizado foi de 28 minutos, não foram observadas diferenças entre os valores obtidos, independente do volume de ácido utilizado, bem como foi observado para o tempo de revolvimento de 14 minutos. Já para o tempo de 21 minutos, a porcentagem de plântulas anormais observadas com o uso de 0,28 L foi igual às observadas quando se utilizou 0,20 L de ácido metanossulfônico, sendo que estes valores foram superiores aos observados quando o uso foi de 0,36 L do mesmo ácido. Ao analisar os tempos de revolvimento dentro de cada volume de ácido utilizado, foi possível observar que com o uso de 0,36 L não houve diferença na porcentagem de plântulas anormais, independente dos tempos de revolvimento utilizados.

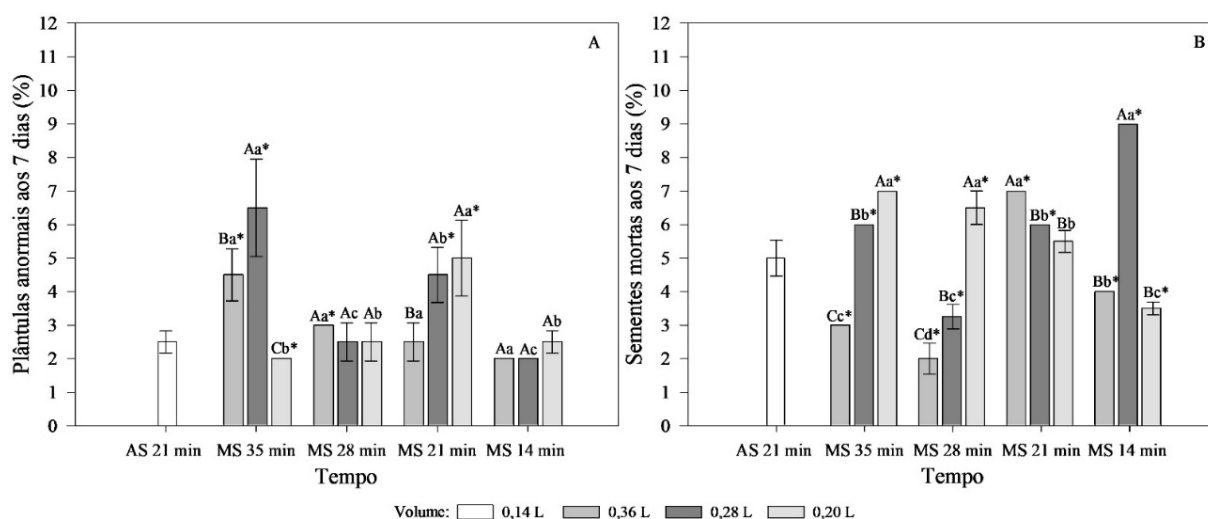
Quando o volume utilizado foi de 0,28 L o maior tempo de revolvimento proporcionou maiores valores de plântulas anormais, seguido do tempo de 21 minutos. Os tempos de revolvimento de 28 e 14 minutos, neste volume, proporcionaram iguais porcentagens de plântulas anormais, sendo estes os menores valores observados. Para o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico, o tempo de revolvimento de 21 minutos proporcionou maiores valores percentuais de plântulas anormais, e os demais tempos não se diferenciaram entre si. Quando da comparação de todos os tratamentos com o controle, foi possível observar que o uso de 0,36 L e 0,28 L por 35 minutos, 0,36 L por 28 minutos, 0,28 L e 0,20 L por 21 minutos promoveu maiores porcentagens de plântulas anormais em relação ao uso do ácido sulfúrico. Já o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento, ocasionou menores valores de plântulas anormais, se comparadas ao uso do outro ácido.

Em relação a porcentagem de sementes mortais avaliadas na contagem final do teste de germinação (Figura 7B), foi observado que para os tempos de 35 e 28 minutos, o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico proporcionou maiores valores, seguido do uso de 0,28 L e 0,36 L, respectivamente. Para o tempo de 21 minutos de revolvimento, o volume de 0,36 L promoveu maior porcentagem de sementes mortas do que o uso de 0,28 L que, por sua vez, igualou-se ao uso de 0,20 L. Para o tempo de 14 minutos, os maiores valores foram observados quando do uso de 0,28 L de ácido metanossulfônico, sendo que os demais volumes não se diferenciaram entre si. Quando analisados os tempos dentro de cada volume, foi observado que para o volume de 0,36 L o tempo de 21 minutos proporcionou maior número de sementes mortas, seguidos dos tempos de 14, 35 e 28 minutos respectivamente.

Quando o volume utilizado foi de 0,28 L, o menor tempo ocasionou as maiores porcentagens de sementes mortas. O tempo de 28 minutos de revolvimento, por sua vez, ocasionou os menores valores para este parâmetro analisado. Já os tempos de 35 e 21 minutos promoveram iguais resultados de sementes mortas. Para o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico utilizado, o tempo de 35 minutos de revolvimento proporcionou o mesmo número de sementes mortas do que o tempo de 28 minutos, sendo que este foi superior aos valores obtidos com o tempo de 21 que foi superior aos valores obtidos com o tempo de 14 minutos.

Quando comparados os tratamentos com o controle, foi observado que no tempo de 35 minutos os volumes de 0,28 L e 0,20 L, no tempo de 28 minutos o volume de 0,20 L, no tempo de 21 minutos os volumes de 0,36 L e 0,28 L e no tempo de 14 minutos o volume de 0,28 L a porcentagem de sementes mortas foi superior àquela obtida quando do uso do ácido sulfúrico para o deslincamento. Já para o tempo de 35 minutos com o uso de 0,36 L, 28 minutos com o uso de 0,36 L e 0,28 L e 14 minutos com o uso de 0,36 L e 0,20 L o número de sementes mortas foi menor do que o observado no controle.

Figura 7 – Porcentagem de plântulas anormais (A) e sementes mortas (B), avaliadas na contagem final do teste de germinação de sementes de algodão, realizada aos 7 dias após a semeadura.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula (para volume dentro de tempo) e letra minúscula (para tempo dentro de volume) não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

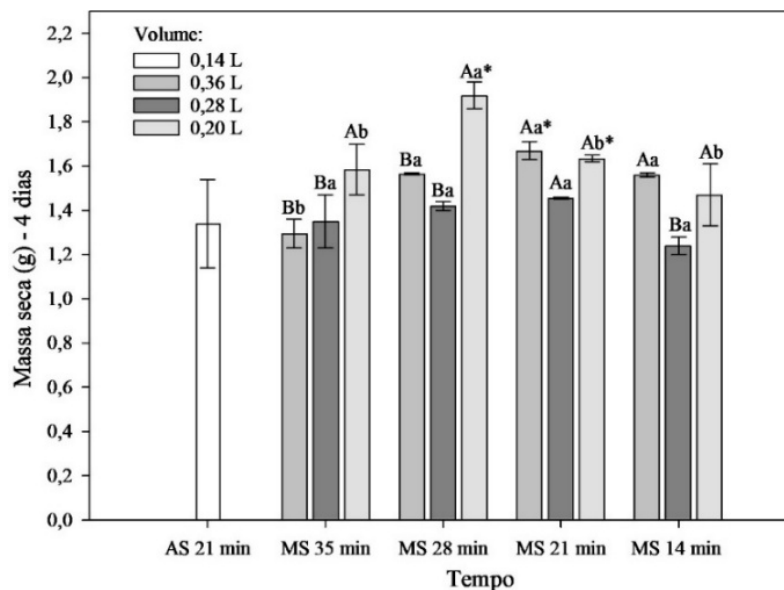
Fonte: Da autora (2026).

Para a análise da massa seca das plântulas aos 4 dias após a semeadura (Figura 8) no tempo de revolvimento de 35 minutos o volume de 0,20 L de ácido apresentou o maior valor, bem como para o tempo de 28 minutos de revolvimento. Para o tempo de 21 minutos, não houve diferença entre os volumes de ácido utilizado. Já para o menor tempo de revolvimento (14 minutos) a massa seca de plântulas aos 4 dias quando do uso de 0,36 L se igualou ao valor obtido quando do uso de 0,20 L, sendo estes superiores aos valores obtidos quando do uso de 0,28 L.

Quando analisado os tempos de revolvimento dentro de cada volume de ácido utilizado, observou-se que para o volume de 0,36 L os resultados de massa seca de plântulas aos 4 dias após a semeadura quando o tempo de revolvimento foi de 28 minutos, se igualou aos resultados obtidos quando o tempo de revolvimento foi de 21 e 14 minutos, sendo estes superiores aos obtidos quando o tempo de revolvimento foi de 35 minutos. Quando utilizado 0,28 L de ácido, independente do tempo de revolvimento, o resultado obtido foi o mesmo. Já quando o volume utilizado foi de 0,20 L, o tempo de revolvimento de 28 minutos se mostrou mais efetivo que os demais, que se igualaram entre si.

Ao se comparar cada tratamento com o controle, observou-se que o uso de 0,20 L de ácido por 28 minutos de revolvimento, o mesmo volume no tempo de 21 minutos, bem como o uso de 0,36 L de ácido por 21 minutos ocasionou resultados diferentes e superiores ao uso do ácido sulfúrico (controle).

Figura 8 – Valores médios de massa seca, em gramas, de plântulas de algodão avaliadas na primeira contagem do teste de germinação, realizada aos 4 dias após a semeadura.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula (para volume dentro de tempo) e letra minúscula (para tempo dentro de volume) não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

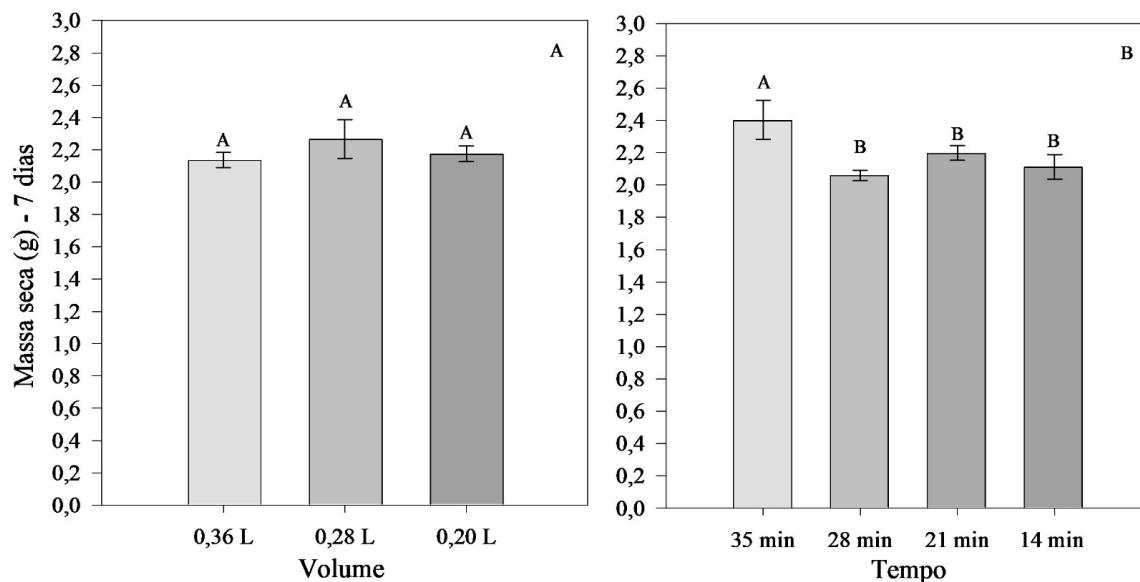
Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para a análise da massa seca das plântulas aos 7 dias após a semeadura, não houve interação entre os fatores: volume de ácido utilizado e tempos de revolvimento das sementes com o ácido. Sendo assim, cada fator foi analisado de forma isolada.

Para o fator volume (Figura 9A) não houve diferença entre os tratamentos, independente do volume de ácido utilizado. Para o fator tempo de revolvimento (Figura 9B) é possível observar que o revolvimento de 35 minutos de duração apresentou maior resultado do que os demais, que não se diferenciaram entre si.

Figura 9 – Valores médios de massa seca de plântulas de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura, em função do volume de ácido metanossulfônico utilizado (A) e do tempo de revolvimento da mistura: ácido + sementes (B), em gramas.

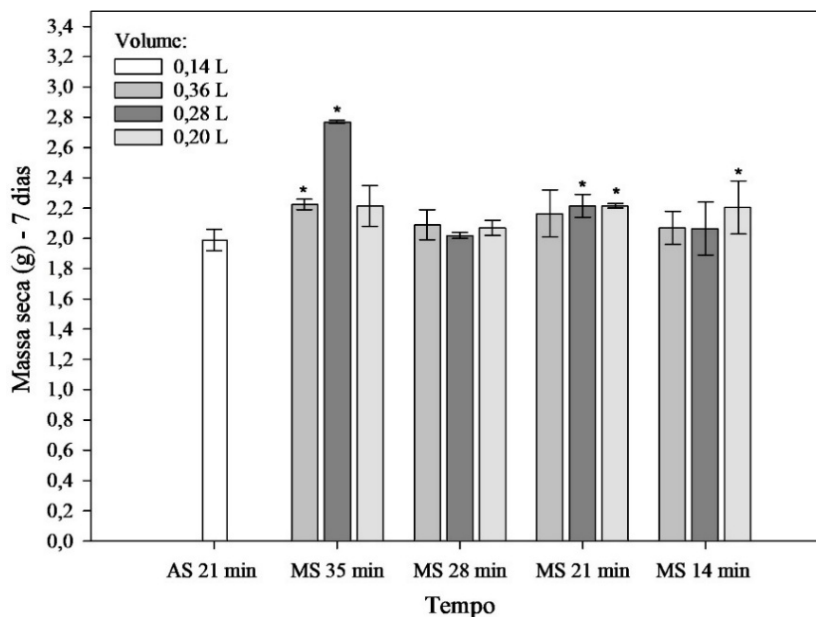


Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Comparando cada tratamento utilizado com o controle, pode-se observar que a massa seca de plântulas aos 7 dias após a semeadura (Figura 10) quando utilizados 0,36 L e 0,28 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento, 0,28 L e 0,20 L por 21 minutos e 0,20 L por 14 minutos foi diferente e superior ao controle.

Figura 10 – Valores médios de massa seca de plântulas de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura, em gramas.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Com relação à análise de imagem de plântulas aos 4 dias após a semeadura: observou-se que o comprimento total (Figura 11A), independente do tempo de revolvimento, o uso de 0,20 L de ácido promoveu um maior desenvolvimento de plântulas, seguido do uso de 0,36 L e 0,28 L respectivamente, exceto para o tempo de 21 minutos em que estes dois últimos não diferiram entre si.

Quando da análise dos tempos dentro de cada volume utilizado, para o maior volume os três maiores tempos promoveram igual comprimento total de plântulas, sendo superiores ao menor tempo. Para o uso de 0,28 L, o tempo de 28 minutos de revolvimento igualou-se ao resultado obtido do tempo de 21 minutos, sendo superiores aos tempos de 35 e 14 minutos que também foram iguais entre si. Para o menor volume de ácido utilizado, o tempo de 28 minutos promoveu um maior comprimento de plântulas que os demais tempos, que igualaram seus resultados entre si.

Ao comparar cada tratamento com o controle, observou-se que o uso de 0,20 L, independente do tempo de revolvimento, promoveu um maior comprimento total de plântulas. Já o uso de 0,28 L por 35, 28 e 14 minutos, bem como o uso de 0,36 L por 14 minutos ocasionaram um menor comprimento total de plântulas quando comparados ao uso do ácido sulfúrico.

O comprimento de raiz (Figura 11B), por sua vez, não diferiu quando o tempo de revolvimento foi de 21 minutos, independente do volume de ácido metanossulfônico utilizado. Já para os demais tempos, o uso de 0,20 L proporcionou maiores comprimentos de raiz do que o uso de 0,36 L que, por sua vez, proporcionou maiores comprimentos de raiz do que o uso de 0,28 L de ácido metanossulfônico. Ao comparar os tempos de revolvimento dentro de cada volume utilizado, observou-se que para o volume de 0,36 L de ácido metanossulfônico o tempo de 28 minutos de revolvimento promoveu maiores valores de comprimento de raiz do que os demais tempos, que foram iguais entre si.

Já para o uso de 0,28 L de ácido metanossulfônico o tempo de 28 minutos de revolvimento igualou-se ao tempo de 21 minutos, sendo estes superiores aos demais tempo, que não se diferiram entre si. Para o menor volume de ácido utilizado, os dois maiores tempos de revolvimento promoveram maiores comprimentos de raiz, sendo estes iguais entre si, assim como os dois menores tempos, que não se diferiram entre si.

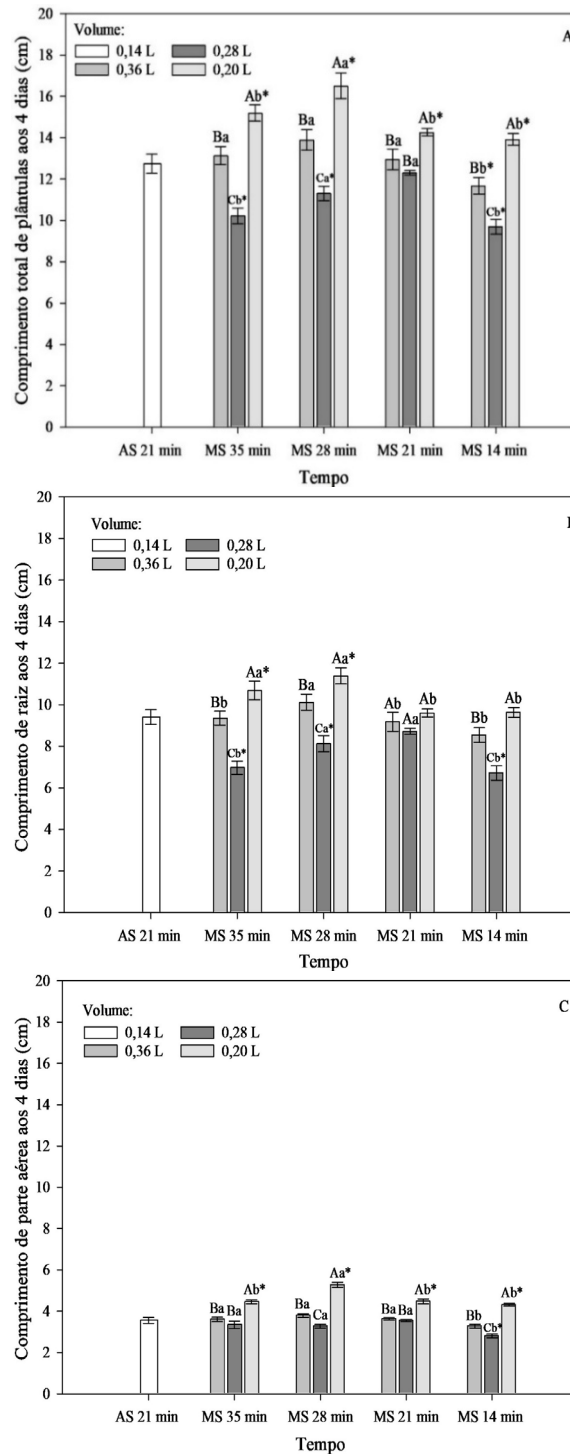
Quando comparados ao uso do ácido sulfúrico, o uso de 0,20 L por 35 e 28 minutos promoveu maiores comprimentos de raiz. Já o uso de 0,28 L por 35, 28 e 14 minutos promoveu menores valores de comprimento de raiz do que o controle.

Na Figura 11C estão apresentados os comprimentos médios de parte aérea, onde é possível observar que independente do tempo de revolvimento utilizado, o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico para o deslindamento de sementes de algodão promoveu maiores valores de comprimento de parte aérea das plântulas. Para os tempos de 35 e 21 minutos, os demais volumes não se diferiram entre si. Para os tempos de 28 e 14 minutos, o maior volume utilizado ocasionou maiores comprimentos de parte aérea do que o uso de 0,28 L.

Quando analisados os tempos de revolvimento dentro de cada volume utilizado, observou-se que para o uso de 0,36 L e 0,28 L, os três maiores tempos de revolvimento não diferiram nos valores médios de comprimento de parte aérea, sendo superiores ao menor tempo. Já para o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico, o tempo de revolvimento de 28 minutos proporcionou maiores valores médios de parte aérea, sendo que os demais tempos utilizados não se diferenciaram entre si.

Ao se comparar cada tratamento com o controle, observou-se que o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico independente do tempo de revolvimento analisado ocasionou maiores comprimentos de parte aérea do que quando utilizado o ácido sulfúrico para o deslindamento. Já o uso de 0,28 L por 14 minutos de revolvimento proporcionou menores valores médios deste parâmetro, quando comparados ao controle.

Figura 11 – Análise de imagem de plântulas de algodão avaliadas na primeira contagem do teste de germinação, realizadas aos 4 dias após a semeadura: comprimento total (A), comprimento de raiz (B) e comprimento de parte aérea (C), em centímetros.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

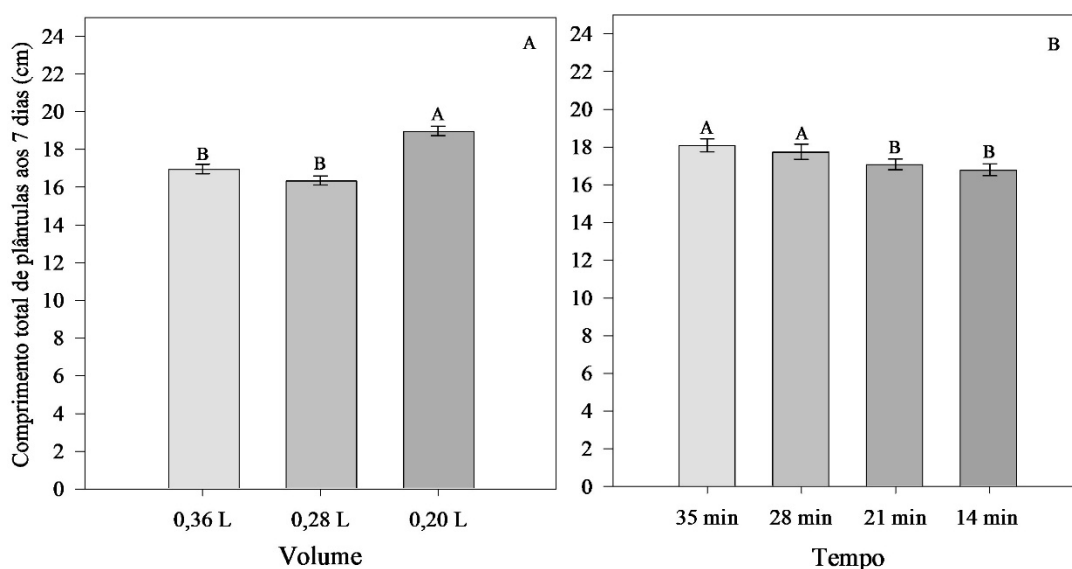
Médias seguidas da mesma letra maiúscula (para volume dentro de tempo) e letra minúscula (para tempo dentro de volume) não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para o comprimento total de plântulas analisadas com o auxílio da análise de imagem aos 7 dias após a semeadura, em função do volume (Figura 12A), observou-se que o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico promoveu maiores valores médios do que os demais volumes utilizados, que não apresentaram diferenças entre si. Quando analisado esse mesmo parâmetro, porém em função do tempo de revolvimento (Figura 12B), observou-se que os tratamentos 35 e 28 minutos proporcionaram resultados que foram iguais entre si e superiores aos demais, que também foram iguais entre si (21 e 14 minutos).

Figura 12 – Análise de imagem de plântulas de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura: comprimento total de plântulas em função do volume de ácido metanossulfônico utilizado (A) e do tempo de revolvimento da mistura: ácido + sementes (B), em centímetros.

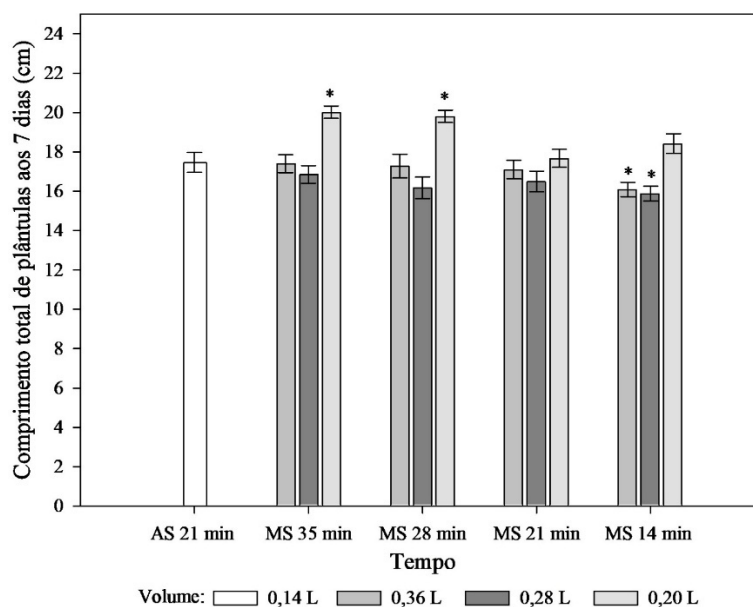


Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Quando da comparação entre todos os tratamentos e o controle, observou-se que o uso de 0,20 L por 35 e 28 minutos de revolvimento proporcionou maiores valores médios de comprimento total de plântulas aos 7 dias após a semeadura. Já o uso de 0,36 L de ácido metanossulfônico por 14 minutos de revolvimento, bem como o uso de 0,28 L por 14 minutos, ocasionaram menores valores deste parâmetro, quando comparados ao uso do ácido sulfúrico.

Figura 13 – Análise de imagem de plântulas de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura: comprimento total de plântulas, em centímetros.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Aos 7 dias após a semeadura, o comprimento de raiz (Figura 14A), avaliado com o auxílio da análise de imagem, no tempo de revolvimento de 35 e 28 minutos foi superior quando utilizados 0,20 L de ácido. Os demais volumes para estes tempos proporcionaram valores médios de comprimento de raiz iguais. Já para os tempos de 21 e 14 minutos, não houve diferença independente do volume de ácido utilizado.

Quando analisados os tempos dentro de cada volume, observou-se que para os dois maiores volumes de ácido metanossulfônico utilizados, o tempo de revolvimento não influenciou no comprimento médio de raiz, promovendo iguais valores entre eles. Já para o volume de 0,20 L observou-se que os dois maiores tempos de revolvimento se igualaram entre si, sendo superiores aos dois menores tempos que também se igualaram. Ao comparar cada tratamento com o controle, observou-se que o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 e 28 minutos proporcionou maiores valores médios de raiz.

Para o comprimento de parte aérea avaliado na contagem final do teste de germinação (Figura 14B), com o auxílio de análise de imagem, observou-se que quando a mistura: ácido + sementes foi revolvida por 35 minutos, os volumes de 0,28 L e 0,20 L de ácido utilizado proporcionaram maiores valores do que com o uso de 0,36 L, sendo que estes valores foram

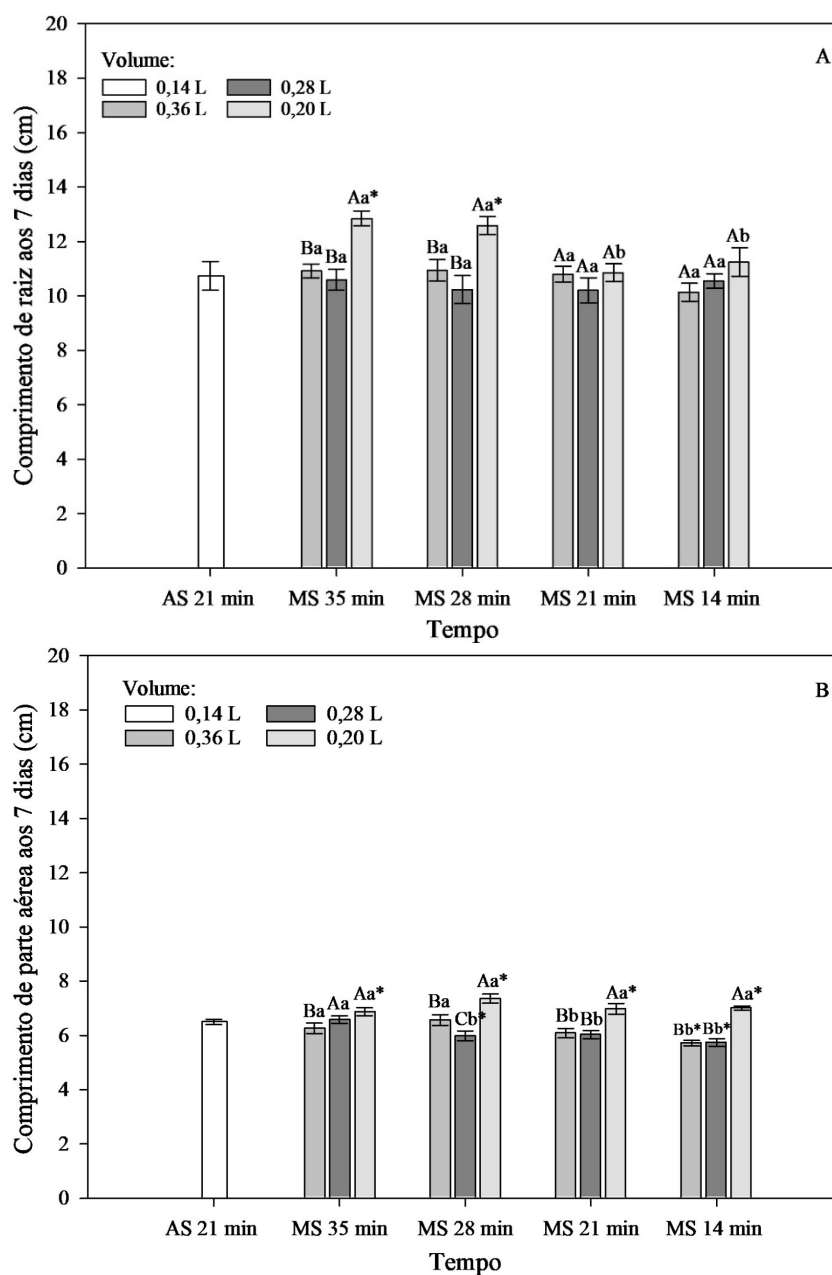
iguais entre si. Para os demais tempos de revolvimento, o uso de 0,20 L promoveu maiores comprimentos médios de parte aérea.

É possível observar ainda que para o tempo de 28 minutos de revolvimento, o uso de 0,36 L de ácido metanossulfônico proporcionou maiores resultados do que o uso de 0,28 L do mesmo ácido. Já para os dois menores tempos de revolvimento, os dois maiores volumes de ácido utilizados promoveram iguais valores médios de comprimento de parte aérea.

Analisando os diferentes tempos de revolvimento dentro de cada volume utilizado, observou-se que para o volume de 0,36 L os dois maiores tempos de revolvimento promoveram iguais valores médios de comprimento parte aérea, sendo estes superiores aos valores obtidos com os dois menores tempos de revolvimento, que também igualam seus valores entre si. O uso de 0,28 L por 35 minutos de revolvimento ocasionou maiores valores médios de comprimento de parte aérea, sendo que os demais volumes utilizados não ocasionaram diferença entre eles. Para o menor volume de ácido metanossulfônico utilizado, o tempo de revolvimento foi indiferente, promovendo iguais valores de comprimento médio de parte aérea, independente de qual deles foi utilizado.

Ao comparar-se cada tratamento com o controle, observou-se que o uso de 0,20 L, independentemente do tempo de revolvimento utilizado, proporcionou maiores comprimentos de parte aérea do que quando utilizado o ácido sulfúrico para o deslincamento das sementes. Já quando se utilizou 0,28 L de ácido metanossulfônico por 28 e 14 minutos, os valores de parte aérea observados foram menores dos que os observados no controle.

Figura 14 – Análise de imagem de plântulas de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizadas aos 7 dias após a semeadura: comprimento de raiz (A) e comprimento de parte aérea (B), em centímetros.



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Médias seguidas da mesma letra maiúscula (para volume dentro de tempo) e letra minúscula (para tempo dentro de volume) não se diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do tratamento com Ácido sulfúrico (controle) de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

4 DISCUSSÃO

A variação dos teores de água das sementes de algodão evidencia que o processo de deslintamento químico interfere diretamente na higroscopicidade e no comportamento físico do tegumento das sementes de algodão. O teor de água observado no tratamento controle (10,09%), valor inferior ao da maioria dos tratamentos com ácido metanossulfônico, sugere a elevada eficiência do ácido sulfúrico na remoção do linter e na modificação da superfície do tegumento, reduzindo a retenção de umidade após o processo. Resultados semelhantes foram descritos por Ferraz, Barros e Silva (1977), Maeda, Lima e Carvalho (1977) e Vaz-Tostes *et al.* (2025), os quais destacam o ácido sulfúrico como altamente eficiente na degradação das fibras celulósicas do linter, favorecendo maior exposição do tegumento e reduzindo a retenção de água na superfície das sementes.

De forma análoga, o uso de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento apresentou teor de água menor (8,86%). Esse comportamento pode ser atribuído à ação do ácido metanossulfônico como ácido orgânico forte, capaz de degradar o linter de forma eficiente, porém com menor caráter oxidante quando comparado ao ácido sulfúrico, o que resulta em menor agressividade ao tegumento. A baixa pressão de vapor e a ausência de ação desidratante intensa do ácido metanossulfônico também contribuem para esse efeito (Joseph; Kenneth, 2015). É possível inferir que, em determinadas combinações de volume e tempo, como a citada anteriormente, o ácido pode promover não apenas a remoção eficiente do linter, mas também maior desidratação superficial das sementes, provavelmente em função de maior exposição do tegumento e intensificação da evaporação durante a etapa subsequente ao tratamento.

De acordo com Marcos Filho (2015), pequenas variações no teor de água após tratamentos químicos refletem alterações na permeabilidade do tegumento e na integridade das camadas externas da semente. Esse resultado sugere ainda que a combinação entre tempo de exposição e concentração do agente químico é determinante para o grau de modificação estrutural do tegumento, bem como observou Von Pinho *et al.*, (2020), em que tratamentos químicos mais intensos puderam reduzir a capacidade de retenção hídrica da semente após o deslintamento.

Para o tempo de 28 minutos, a menor amplitude de variação dos teores de água (10,59% a 12,25%) sugere uma condição mais equilibrada entre remoção do linter e estabilidade hídrica das sementes. Essa resposta indica que tempos intermediários podem reduzir a heterogeneidade entre tratamentos, minimizando extremos de absorção ou perda de água. A uniformidade do

teor de água entre tratamentos é um aspecto desejável, pois reduz interferências na avaliação subsequente da qualidade fisiológica e do vigor das sementes.

No menor tempo avaliado (MS 14 min), os teores de água permaneceram relativamente elevados (11,31% a 12,51%). A literatura é consistente ao indicar que tempos reduzidos de contato ácido-semente tendem a preservar parte do línier, o que compromete a uniformidade física e favorece maior teor de água residual (Silva *et al.*, 2009; Cossa *et al.*, 2023). O línier, por sua natureza celulósica, atua como material altamente higroscópico, favorecendo a retenção de água na superfície da semente (Lopes *et al.*, 2006; Cossa *et al.*, 2023).

O teor de água das sementes de algodão foi influenciado pela interação entre o volume de ácido metanossulfônico e o tempo de revolvimento da mistura: ácido + sementes, indicando que a intensidade do tratamento químico pode alterar a dinâmica de hidratação das sementes após o deslintamento, seja pela excessiva permeabilização do tegumento ou pela remoção incompleta do línier. Deste modo, a remoção do línier modifica a permeabilidade do tegumento, afetando tanto a absorção quanto a perda de água pelas sementes. Variações no teor de água podem influenciar diretamente os testes de vigor, a longevidade das sementes durante o armazenamento e o desempenho inicial das plântulas, podem ter implicações diretas sobre o metabolismo inicial das sementes, uma vez que teores mais elevados favorecem a ativação metabólica, mas também podem aumentar a suscetibilidade a danos oxidativos ou à lixiviação de solutos (Marcos Filho, 2015). O teor de água é um dos principais fatores moduladores da expressão do vigor e da velocidade de germinação, podendo interferir diretamente na interpretação de testes fisiológicos subsequentes.

A primeira contagem do teste de germinação é um indicador sensível de vigor, refletindo a rapidez e a uniformidade do processo germinativo, características diretamente associadas à integridade das membranas e à preservação das estruturas vitais da semente (Marcos Filho, 2015). O maior percentual de plântulas normais observado com o uso de 0,20 L de ácido, independentemente do tempo de revolvimento, sugere que esse volume promoveu remoção eficiente do línier sem provocar danos excessivos ao tegumento ou ao embrião. Doses moderadas de ácido tendem a otimizar o equilíbrio entre eficiência de deslintamento e preservação da integridade fisiológica da semente, reduzindo riscos de escarificação excessiva, lixiviação de solutos celulares e injúrias químicas latentes, que comprometem o vigor inicial avaliado na primeira contagem de germinação (Santiago, 1978; Medeiros Filho *et al.*, 2006).

A literatura descreve que volumes intermediários de ácido sulfúrico, quando associados a tempos prolongados, podem potencializar microdanos ao tegumento e ao eixo embrionário em sementes de algodão, refletindo em anormalidades morfológicas das plântulas, sem

necessariamente causar morte imediata das sementes (Vieira; Carvalho, 1994; Carvalho; Nakagawa, 2012).

Nesse contexto, no tempo de 35 minutos, a maior porcentagem de plântulas anormais observada aos 4 dias com o uso de 0,28 L de ácido, em comparação aos volumes de 0,36 L e 0,20 L, sugere que combinações intermediárias de volume e tempo prolongado podem ter promovido alterações estruturais no tegumento suficientes para comprometer o desenvolvimento normal das plântulas. Marcos-Filho (2015) afirma que danos subletais às membranas celulares tendem a se manifestar como anormalidades morfológicas durante a germinação, especialmente quando o estresse ocorre durante o processamento.

Na comparação com o controle (ácido sulfúrico), observa-se que apenas algumas combinações específicas se igualaram a ele em porcentagem de plântulas anormais, enquanto a maioria dos tratamentos com ácido metanossulfônico apresentou valores superiores. Esse resultado indica que, embora o ácido metanossulfônico represente uma alternativa tecnicamente viável, sua eficiência fisiológica depende fortemente do ajuste fino entre dose e tempo, diferentemente do ácido sulfúrico, cujo comportamento é mais previsível quando corretamente neutralizado (Tostes *et al.*, 2023).

Nos tempos de 35 e 28 minutos, o maior percentual de sementes mortas aos 4 dias com 0,20 L de ácido indica que, quando associado a tempos mais longos, mesmo volumes reduzidos podem promover estresse químico suficiente para inviabilizar sementes mais sensíveis. A literatura destaca que resíduos ácidos ou desuniformidade no tratamento químico estão diretamente associados ao aumento da mortalidade de sementes, especialmente quando avaliadas em testes precoces de germinação (Santiago, 1978; Medeiros Filho *et al.*, 2006). É válido ressaltar ainda que sementes mortas na primeira contagem estão frequentemente associadas a danos no beneficiamento, quando há comprometimento irreversível das membranas celulares (Vieira; Carvalho, 1994).

O teste de germinação, em sua contagem final, expressa predominantemente a viabilidade das sementes, refletindo a capacidade do embrião de completar o processo germinativo sob condições favoráveis, mesmo quando o início da germinação é retardado ou desuniforme. (Novembre, 1994; Marcos Filho, 2015). Dessa forma, a ausência de diferenças na contagem final indica que os tratamentos não provocaram danos letais ao embrião nem comprometeram de forma irreversível os tecidos essenciais ao desenvolvimento das plântulas normais. Embora alguns tratamentos tenham afetado negativamente o desempenho inicial, evidenciado pelo aumento de plântulas anormais e sementes mortas na primeira contagem, tais

efeitos não foram capazes de inviabilizar o desenvolvimento das plântulas oriundas de sementes mais vigorosas ao longo do período total do teste.

A inexistência de diferenças significativas tanto para o fator volume de ácido quanto para o tempo de revolvimento, em relação a plântulas normais na contagem final do teste de germinação, demonstra que os tratamentos avaliados permaneceram dentro de uma faixa operacional considerada fisiologicamente segura para as sementes de algodão. Resultados semelhantes são amplamente descritos na literatura, na qual se observa que injúrias decorrentes do deslintamento químico tendem a se manifestar prioritariamente em testes de vigor, enquanto a germinação final apresenta maior tolerância a estresses moderados impostos durante o processo de deslintamento e neutralização (Santiago, 1978; Otazú, 1986; Medeiros Filho *et al.*, 2006).

A ausência de diferenças significativas nas plântulas normais na contagem final do teste de germinação ao se comparar todos os tratamentos com o controle (ácido sulfúrico) indica que o ácido metanossulfônico, independentemente do volume e do tempo de revolvimento avaliados, preservou a capacidade germinativa final das sementes em níveis semelhantes aos obtidos com o método tradicional. A literatura relata que o ácido sulfúrico, quando corretamente manejado, é eficiente na remoção do linter sem causar perdas expressivas na germinação final, servindo, portanto, como referência para avaliar a segurança fisiológica de métodos alternativos de deslintamento (Carvalho; Nakagawa, 2012).

Do ponto de vista tecnológico, a manutenção de valores semelhantes de plântulas normais na contagem final entre todos os tratamentos é um indicativo positivo, pois demonstra que o uso do ácido metanossulfônico, dentro das faixas de volume e tempo estudadas, não compromete a qualidade fisiológica básica das sementes. No entanto, conforme enfatizado por Marcos Filho (2015), a ausência de diferenças na germinação final não deve ser interpretada isoladamente como garantia de qualidade, uma vez que diferenças relevantes no vigor podem impactar o estabelecimento do estande e o desempenho das plântulas em condições menos favoráveis de campo.

A comparação com o controle evidencia que várias combinações com ácido metanossulfônico resultaram em maior porcentagem de plântulas anormais, indicando que, apesar de ser uma alternativa viável, esse ácido apresenta maior sensibilidade aos ajustes operacionais. Por outro lado, o tratamento com 0,20 L por 35 minutos, foi o único que resultou em menor porcentagem de plântulas anormais que o controle, demonstrando que, quando adequadamente ajustado, o ácido metanossulfônico pode inclusive superar o desempenho fisiológico do ácido sulfúrico.

A massa seca de plântulas, especialmente em avaliações precoces, constitui um importante indicador do vigor das sementes, pois reflete a eficiência de mobilização das reservas e o crescimento inicial dos tecidos, integrando aspectos fisiológicos e metabólicos não captados exclusivamente pelos testes de germinação (Kumar *et al.*, 2006). Os resultados apresentados na Figura 8 evidenciam clara influência da combinação entre volume de ácido metanossulfônico e tempo de revolvimento sobre a massa seca das plântulas aos quatro dias após a semeadura. Nos tempos mais longos de revolvimento (35 e 28 minutos), o uso de 0,20 L de ácido promoveu os maiores valores de massa seca, indicando que essa combinação favoreceu a expressão do vigor inicial. Volumes adequados de ácido, quando associados a tempos suficientes para remoção eficiente do línter, tendem a preservar a integridade do eixo embrionário e a funcionalidade das membranas celulares, resultando em maior crescimento inicial das plântulas (Luo *et al.*, 2016).

No menor tempo de revolvimento (14 minutos), a maior massa seca observada com 0,36 L e 0,20 L, em comparação a 0,28 L, sugere que o volume intermediário pode ter promovido um deslntamento menos homogêneo nessa condição, comprometendo a uniformidade da embebição e a mobilização das reservas. A literatura aponta que deslntamento incompleto ou heterogêneo pode resultar em menor eficiência fisiológica inicial, refletindo-se diretamente em menor acúmulo de biomassa nas plântulas (Snider *et al.*, 2016; Virk; Snider; Pilon, 2019). É válido ressaltar ainda que a massa seca acumulada é um indicador robusto do desempenho fisiológico, integrando os efeitos de velocidade de germinação, eficiência metabólica e crescimento inicial (Virk; Snider; Pilon, 2020).

A análise de imagens de plântulas constitui uma ferramenta sensível para a avaliação do vigor das sementes, permitindo identificar diferenças no crescimento inicial que frequentemente não são detectadas por testes tradicionais de germinação. Segundo a literatura, medidas morfométricas obtidas por análise de imagem refletem de forma integrada a velocidade de germinação, a eficiência metabólica e o crescimento inicial das plântulas (Alvarenga; Marcos Filho, 2014).

Para os parâmetros que dizem respeito ao tamanho das plântulas, sendo eles: comprimento total, comprimento de raiz e comprimento de parte aérea, tanto para a primeira contagem quanto para a contagem final do teste de germinação, o tratamento com o uso 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento e o tratamento com o uso 0,20 L de ácido metanossulfônico por 28 minutos de revolvimento promoveram maiores resultados, sendo superiores inclusive ao controle. Esses resultados indicam que, embora o ácido sulfúrico

seja eficiente e amplamente utilizado, o uso do ácido metanossulfônico pode resultar em maior vigor inicial.

O comprimento das plântulas, especialmente em estádios iniciais, reflete a eficiência dos processos metabólicos, a reorganização das membranas celulares e a mobilização das reservas (Hall *et al.*, 2024). A parte aérea, por depender diretamente da mobilização das reservas e do funcionamento adequado dos meristemas, reflete de forma integrada os efeitos do tratamento químico sobre a semente (Marcos Filho, 2015). Raízes mais longas nos estádios iniciais refletem maior eficiência fisiológica e maior tolerância a estresses subsequentes devido a maior capacidade de absorção de água e nutrientes (Marcos Filho, 2015). O sistema radicular é reconhecido como uma das estruturas mais sensíveis a danos fisiológicos e químicos, sendo fortemente influenciado pela integridade das membranas e pela uniformidade da embebição (Marcos Filho, 2015). Assim, volumes menores de ácido, associados a tempos suficientes para a remoção do linter, tendem a preservar melhor o potencial de alongamento da raiz.

O comprimento de raiz e o comprimento de parte aérea avaliados aos sete dias após a semeadura constituem indicadores robustos do vigor das sementes, pois refletem a capacidade de crescimento sustentado das plântulas após a fase inicial de reorganização metabólica. Esses parâmetros são particularmente úteis para identificar efeitos residuais do deslinteramento químico que persistem além da germinação inicial (Novembre, 1994; Marcos Filho, 2015).

Cabe ressaltar que o desempenho inicial e reprodutivo de plantas de algodão no campo é dependente do nível de vigor das sementes, em que plantas com maior vigor apresentam maior rendimento de fibras e caroço, e, conseqüente, maior produtividade (Mattioni *et al.*, 2012).

Trabalhos com deslinteramento químico em algodão indicam que a eficiência do processo está diretamente relacionada ao equilíbrio entre remoção do linter e preservação da qualidade fisiológica da semente (Carvalho; Nakagawa, 2012). Volumes excessivos de ácido ou exposições inadequadas podem intensificar a lixiviação de solutos celulares e acelerar processos de deterioração, reduzindo o vigor inicial.

Portanto, os resultados indicam que o ácido metanossulfônico, quando empregado em volume adequado, pode manter ou até melhorar o vigor inicial das sementes de algodão;

Nesse contexto, o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico destacou-se de forma consistente como a condição mais equilibrada, promovendo remoção eficiente do linter, teor de água equilibrado e maior expressão do vigor, evidenciada por maiores percentuais de plântulas normais na primeira contagem, maior acúmulo de massa seca e maiores comprimentos de raiz, parte aérea e plântula total, inclusive em comparação ao controle com ácido sulfúrico.

Embora o ácido sulfúrico apresente comportamento mais previsível e continue sendo uma referência consolidada, os resultados evidenciam que o ácido metanossulfônico, quando corretamente ajustado, pode igualar ou até superar o desempenho fisiológico do método tradicional, especialmente no vigor inicial das plântulas, sem comprometer a germinação final.

5 CONCLUSÕES

De modo geral, os tratamentos com o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 28 minutos de revolvimento e com o volume de 0,20 L de ácido metanossulfônico por 35 minutos de revolvimento mostraram-se mais eficientes no deslincamento de sementes de algodão.

O teor de água e o desempenho fisiológico das sementes de algodão são dependentes da interação entre volume de ácido e tempo de revolvimento, indicando que a intensidade do tratamento é determinante.

Massa seca e o desenvolvimento das plântulas mostram maior sensibilidade do que a germinação final para detectar efeitos do deslincamento químico.

Nenhum tratamento compromete a viabilidade das sementes, mantendo a germinação final semelhante ao controle com ácido sulfúrico.

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R. O.; MARCOS-FILHO, J. Vigor evaluation of stored cotton seeds, including the seed vigor imaging system (SVIS®). **Journal of Seed Science**, v. 36, p. 222-230, 2014.
- BRASIL. **Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013**. Estabelece padrões para produção e comercialização de sementes de algodão. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2013.
- BRASIL. **Lei nº 10.711, de 5 de agosto de 2003**. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudanças. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2003.
- BRASIL. Regras para Análise de Sementes. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**, 399 p., 2009.
- BRUNETTA, E.; BRUNETTA, P. S. F. Produção de sementes de algodão. In: FREIRE, E. C. Algodão no Cerrado do Brasil. **ABRAPA**, 2015
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. Sementes: ciência, tecnologia e produção. **FUNEP**, 5. ed., 2012.
- COSSA, N. H. S. *et al.* An alternative approach to conducting germination tests on chemically treated and untreated stored cotton seeds. **Journal of Seed Science**, v. 45, 2023.
- FERRAZ, E. C.; BARROS, A. S. R.; SILVA, W. R. Influência do deslindamento químico e mecânico na qualidade fisiológica de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 1, n. 2, p. 17-24, 1977.
- HALL, S. *et al.* Effect of cotton seed size and seeding density on cotton growth, development, and yield. **Agronomy Journal**, v. 116, n. 6, p. 2967-2975, 2024.
- JOSEPH, P. B.; KENNETH, L. Z. **Composição e método para deslindamento de sementes de algodão**. Depositante: BASF SE. BR nº 112016020372-0 B. Depósito: 03 mar. 2015. Concessão: 18 jan. 2022. 2015
- KUMAR, R. *et al.* Partitioning of dry matter during drought stress in rainfed lowland rice. **Field Crops Research**. v. 96, n. 2-3, p. 455-465, 2006.
- LOPES, K. P. *et al.* Efeito do beneficiamento na qualidade fisiológica e sanitária de sementes do algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 426-435, 2006.
- LUO, H. H. *et al.* Effects of water stress and rewatering on photosynthesis, root activity, and yield of cotton with drip irrigation under mulch. **Photosynthetica**, v. 54, n. 1, p. 65-73, 2016.
- MAEDA, J. A.; LIMA, M. C.; CARVALHO, N. M. Efeito de métodos de deslindamento na germinação, vigor e armazenamento de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 1, n. 2, p. 25-32, 1977.
- MARCOS FILHO, J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. **ABRATES**, 2. ed., 2015.

MATTIONI, F. *et al.* Vigor de sementes e desempenho agrônômico de plantas de algodão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 34, n. 1, p. 108-116, 2012.

MEDEIROS FILHO, S. *et al.* Metodologia do teste de germinação em sementes de algodão, com linter e deslintadas. **Revista Caatinga**, 19, n.1, p. 56-60, 2006.

NOVEMBRE, A. D. L. C. Estudo da metodologia para a condução do teste de germinação em sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) deslintadas mecanicamente. **Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

OTAZÚ, C. S. I. Efeito de métodos de deslintamento sobre o comportamento de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) no armazenamento. **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1986.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, 2024.

SANTIAGO, I. M. Influência do deslintamento à flama e químico sobre a germinação, o vigor e o desempenho no campo de sementes de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.). **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, Universidade de São Paulo, 1978.

SILVA, C. A. D. *et al.* Algodoeiro herbáceo em sistema de cultivo adensado: atualidades e perspectivas. **Embrapa Algodão**, Documentos 219, 27 p., 2009.

SNIDER, J. L. *et al.* The impact of seed size and chemical composition on seedling vigor, yield, and fiber quality of cotton in five production environments. **Field Crops Research**, v. 193, p. 186-195, 2016.

TOSTES, D. P. V. *et al.* Neutralization of cotton seeds after chemical delinting. **Water Air And Soil Pollution**, v. 234, 16 p., 2023.

VAZ-TOSTES, D. P. *et al.* Image analysis as cotton seed chemical delinting evaluation tool. **Multimedia Tools and Applications**, v. 84, n. 26, p. 30851-30864, 2025.

VIEIRA, R. D.; CARVALHO, N. M. Testes de vigor em sementes. **FUNEP**, 1994.

VIRK, G.; SNIDER, J. L.; PILON, C. Associations between first true leaf physiology and seedling vigor in cotton under different field conditions. **Crop Science**, v. 60, n. 1, p. 404-418, 2020.

VIRK, G.; SNIDER, J. L.; PILON, C. Physiological contributors to early-season whole-crop vigor in cotton. **Crop Science**, v. 59, n. 6, p. 2774-2783, 2019.

VON PINHO, E. V. R. *et al.* Teste de tetrazólio em sementes de algodão. *In*: J. A. O.; KRZYZANOWSKI, F. C.; FRANÇA-NETO, J. B. **Vigor de sementes: conceitos e testes**. 2 ed., p. 417-430, 2020.

ARTIGO 2 – ANÁLISE BIOQUÍMICA DE PLÂNTULAS ORIUNDAS DE SEMENTES DE ALGODÃO DESLINTADAS COM ÁCIDO METANOSSULFÔNICO

RESUMO

A qualidade fisiológica das sementes de algodão está diretamente associada à integridade metabólica e estrutural dos tecidos, sendo o deslintamento químico uma etapa crítica nesse processo. O ácido sulfúrico é amplamente utilizado, porém pode causar alterações bioquímicas e estruturais quando mal ajustado o volume e tempo de mistura, o que tem impulsionado a busca por alternativas menos agressivas, como o ácido metanossulfônico. Diante disso, objetivou-se com o presente estudo avaliar as respostas fisiológicas, bioquímicas e estruturais de sementes de algodão deslintadas com ácido sulfúrico e ácido metanossulfônico. Sementes da cultivar DP 1536 B2RF foram submetidas ao deslintamento com ácido metanossulfônico ($0,36 \text{ L kg}^{-1}$) por 14, 21, 28 e 35 minutos, avaliando-se germinação, vigor, massa seca de plântulas, teor de água, teores de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e malondialdeído (MDA), atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), além da caracterização do tegumento por microscopia eletrônica de varredura. O ácido metanossulfônico proporcionou desempenho germinativo semelhante ao ácido sulfúrico e superior ao das sementes com linter, com maior acúmulo inicial de massa seca nos menores tempos de revolvimento. As análises bioquímicas indicaram modulação do metabolismo oxidativo, com incremento na atividade de SOD e CAT, sem alterações na APX, evidenciando manutenção do equilíbrio redox. A microscopia eletrônica confirmou remoção eficiente do linter e preservação estrutural do tegumento. Conclui-se que o ácido metanossulfônico é alternativa viável ao ácido sulfúrico para o deslintamento de sementes de algodão.

Palavras-chave: qualidade fisiológica de sementes; deslintamento químico; metabolismo oxidativo; enzimas antioxidantes; estrutura do tegumento.

ABSTRACT

The physiological quality of cotton seeds is directly associated with the metabolic and structural integrity of the tissues, and chemical delinting is a critical step in this process. Sulfuric acid is widely used, but it can cause biochemical and structural changes when the volume and mixing time are poorly adjusted, which has driven the search for less aggressive alternatives, such as methanesulfonic acid. Therefore, the objective of the present study was to evaluate the physiological, biochemical and structural responses of cotton seeds delinted with sulfuric acid and methanesulfonic acid. Seeds of the cultivar DP 1536 B2RF were subjected to delinting with methanesulfonic acid (0.36 L kg^{-1}) for 14, 21, 28 and 35 minutes, evaluating germination, vigor, seedling dry mass, water content, hydrogen peroxide (H_2O_2) and malondialdehyde (MDA) contents, activity of the enzymes superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX), in addition to the characterization of the integument by scanning electron microscopy. Methanesulfonic acid provided germination performance similar to sulfuric acid and superior to that of seeds with lint, with greater initial accumulation of dry matter in the shortest turning times. The biochemical analyses indicated modulation of oxidative metabolism, with an increase in the activity of SOD and CAT, without changes in APX, showing maintenance of the redox balance. Electron microscopy confirmed efficient removal of the lint and structural preservation of the integument. It is concluded that methanesulfonic acid is a viable alternative to sulfuric acid for the delinting of cotton seeds.

Keywords: seed physiological quality; chemical delinting; oxidative metabolism; antioxidant enzymes; seed coat structure.

1 INTRODUÇÃO

A qualidade fisiológica das sementes está intimamente relacionada à integridade metabólica e estrutural dos tecidos, especialmente durante a germinação, fase caracterizada pela retomada das atividades metabólicas e pelo aumento da taxa respiratória. Esse processo resulta na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), entre elas o peróxido de hidrogênio, que exerce papel central na regulação do metabolismo celular. Em concentrações adequadas, as EROs atuam como moléculas sinalizadoras; entretanto, quando seu acúmulo ultrapassa a capacidade antioxidante da semente, podem desencadear estresse oxidativo e comprometer a qualidade fisiológica (Demidchik, 2015; Mittler *et al.*, 2011; Bailly, 2004).

O processo de deslignamento químico de sementes de algodão, pode interferir diretamente nesse equilíbrio metabólico uma vez que envolve a exposição das sementes a agentes químicos de elevada reatividade, capazes de promover alterações físicas e bioquímicas nos tecidos. O ácido sulfúrico concentrado, amplamente utilizado para esse fim, apresenta elevada eficiência na degradação do linter, mas sua ação oxidante pode afetar a integridade das membranas celulares e do embrião quando as condições de uso não são rigorosamente controladas (Dowd; Manandhar; Delhom, 2019; Lima *et al.*, 2023; Maeda *et al.*, 2021).

Nesse contexto, a utilização de análises bioquímicas tem se mostrado particularmente relevante para a avaliação da qualidade de sementes submetidas a tratamentos químicos. A quantificação de marcadores de estresse oxidativo, como o peróxido de hidrogênio e o malondialdeído, permite identificar alterações metabólicas que nem sempre são detectadas por testes de germinação e vigor. O acúmulo de peróxido de hidrogênio indica desequilíbrios no metabolismo oxidativo, enquanto o aumento do teor de malondialdeído reflete a peroxidação lipídica e o comprometimento da integridade das membranas celulares, eventos diretamente associados à redução do vigor e da longevidade das sementes (McDonald, 1999; Bailly; El-Maarouf-Bouteau; Corbineau, 2008; Gill; Tuteja, 2010).

A manutenção do equilíbrio redox durante a germinação depende da atuação coordenada do sistema antioxidante enzimático, no qual se destacam as enzimas superóxido dismutase, catalase e ascorbato peroxidase. A superóxido dismutase atua na dismutação do radical superóxido, enquanto a catalase e a ascorbato peroxidase regulam a concentração de peróxido de hidrogênio em diferentes compartimentos celulares. Alterações na atividade dessas enzimas têm sido consistentemente associadas a respostas adaptativas ou a danos metabólicos em sementes submetidas a estresses físicos e químicos, constituindo indicadores sensíveis da qualidade fisiológica (Mittler, 2002; Foyer; Noctor, 2005).

Além das respostas bioquímicas, a estrutura do tegumento exerce papel determinante na regulação da embebição, na proteção do embrião e na interação das sementes com agentes externos. O deslntamento químico pode modificar significativamente a superfície do tegumento, desde a remoção eficiente do lnter até alterações estruturais mais profundas e nesse sentido, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) constitui uma ferramenta essencial para a caracterização detalhada da morfologia superficial das sementes, permitindo a visualização de fibras remanescentes, irregularidades e possíveis danos resultantes da ação dos ácidos. Desta forma, a análise estrutural por MEV, quando associada a avaliações bioquímicas, possibilita uma compreensão mais precisa dos efeitos do deslntamento sobre a qualidade das sementes, ampliando a interpretação dos resultados fisiológicos (Vaz-Tostes *et al.*, 2025).

Diante da necessidade de alternativas ao ácido sulfúrico que apresentem menor agressividade operacional e potencial impacto ambiental reduzido, o ácido metanossulfônico tem sido proposto como opção promissora (Joseph; Kenneth, 2015). Entretanto, ainda são limitados os estudos que avaliam de forma integrada seus efeitos sobre o metabolismo oxidativo, o sistema antioxidante e a estrutura do tegumento das sementes de algodão. Assim, no presente estudo objetivou-se avaliar as respostas bioquímicas, fisiológicas e estruturais de sementes de algodão submetidas ao deslntamento químico com ácido sulfúrico e ácido metanossulfônico, por meio da análise de marcadores de estresse oxidativo, da atividade do sistema antioxidante, do desempenho germinativo e da caracterização da superfície do tegumento.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS) da Universidade Federal de Lavras (UFLA). Foram utilizadas sementes de algodão, com línter, da cultivar DP 1536 B2RF, produzidas e fornecidas pela Cooperativa de Produtores Rurais de Catuti, localizada na cidade de Catuti, região norte do estado de Minas Gerais, na safra 2022/2023.

O deslntamento foi realizado utilizando-se 0,36 litros de ácido metanossulfônico por quilograma de sementes com línter, e tempos de revolvimento das sementes com o ácido de 14; 21; 28 e 35 minutos. Sementes deslntadas com 0,14 litros de ácido sulfúrico 98% puro para análise (P.A.) por quilograma de sementes, revolvidas por 21 minutos (Tostes *et al.*, 2023) e sementes com línter foram utilizadas como controle (Tabela 1).

Tabela 1 – Descrição da combinação de tratamentos aplicados as sementes de algodão: Sementes deslntadas com ácido sulfúrico, sementes deslntadas com ácido metanossulfônico no volume de 0,36 L kg⁻¹ com diferentes tempos de revolvimento e sementes com a presença de línter.

Tratamentos	Volume (L kg ⁻¹)	Tempo (min)	Identificação na MEV
Línter	-	-	A
AS	0,14	21	B
MS	0,36	35	C
MS	0,36	28	D
MS	0,36	21	E
MS	0,36	14	F

Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Fonte: Da autora (2026).

Para o deslntamento, foi utilizado um protótipo deslntador mecânico de sementes de algodão. As sementes foram pesadas e colocadas no equipamento, e em seguida foi adicionado o ácido, sendo essa mistura revolvida por diferentes tempos, em sistema rotativo automatizado. Após os tempos pré-estabelecidos de revolvimento, foi adicionado à mistura ácido + sementes um litro de solução de hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂] na concentração de 7,2% (Tostes *et al.*, 2023), sendo a mistura novamente revolvida no protótipo durante 1 minuto, com a finalidade de parar a reação ácida do deslntamento. Em seguida, as sementes foram lavadas em 1 litro de água destilada e colocadas para secar em temperatura ambiente por 24 horas.

Inicialmente, foi determinada a qualidade inicial das sementes, por meio da avaliação do teor de água e testes de germinação e vigor.

O teor de água das sementes foi determinado conforme metodologia descrita nas RAS - Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009), pelo método de estufa a 105 °C.

No teste de germinação foram utilizadas oito repetições de 25 sementes. A semeadura foi realizada sobre duas folhas de papel germitest e sobrepostas com mais uma folha, as quais foram umedecidas com volume de soluções, equivalente a 2,5 vezes o peso seco do papel. Permaneceram em germinador tipo Mangelsdorf regulado a temperatura de 25 °C, com luz constante. A primeira contagem da germinação foi realizada aos 4 dias e a avaliação final ao sétimo dia após a semeadura.

Foi também determinada a massa seca das plântulas oriundas das sementes deslintadas e com linter, aos quatro e aos sete dias após a semeadura. Para isso, foram utilizadas duas repetições de cinco plântulas cada, que foram colocadas em estufa de circulação forçada de ar, à 68 °C por 24 horas (Brasil, 2009).

Para as análises dos testes de germinação e vigor das sementes de algodão foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com oito repetições. Os resultados foram submetidos a análise de variância e, quando significativas, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

As sementes de algodão de cada tratamento também foram submetidas à análise de microscopia eletrônica de varredura, e comparadas com sementes que não foram deslintadas. As sementes de cada tratamento foram imersas em solução fixativa (Karnovsky's modificado), pH 7,2 por 24 horas. Em seguida, foram lavadas em tampão cacodilato por três vezes. A pós-fixação foi feita em tetróxido de ósmio 1%, por uma hora. Após esse período, foram realizadas lavagens com água destilada por três vezes e desidratação em gradiente de acetona (25, 50, 75, 90 e 100%) durante 10 minutos. As amostras foram levadas para o aparelho de ponto crítico, onde se eliminou todo o resíduo de acetona para posterior montagem em stubs para revestimento com ouro. As imagens foram obtidas em quatro partes do tegumento (superior, direita, inferior e esquerda) em microscópio eletrônico de varredura LEO Evo 40.

Para as análises bioquímicas foram utilizadas plântulas de algodão no quarto dia após a instalação do teste de germinação. Estas plântulas foram armazenadas em deep-freezer (-80 °C), até o momento da realização das análises, cujas metodologias estão descritas a seguir:

A avaliação da peroxidação lipídica foi realizada mediante a quantificação do malondialdeído (MDA), que é produzido pela reação de ácido tiobarbitúrico (TBA) com pequena modificação do método de Dhindsa, Dhindsa e Thorpe (1981). Uma amostra de 200 mg de tecido vegetal foi triturada e homogeneizada em 1,25 ml de ácido tricloroacético (TCA) (0,1%) e duodecil sulfato de sódio (SDS) (1%). O homogeneizado foi centrifugado a 15.000

rpm durante 15 min. Para uma alíquota 300 μL do sobrenadante foi adicionado 1 mL de ácido tricloroacético 20% (TCA) a um recipiente contendo 0,5% de ácido tiobarbitúrico TBA. A mistura foi aquecida a 95 °C durante 30 minutos e depois rapidamente esfriada em um banho de gelo. Posteriormente foi feita a leitura de absorbância a 532 nm e a concentração do MDA calculada utilizando o coeficiente de extinção de 155 $\text{mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$ (Barylá *et al.*, 2000).

Para a extração das enzimas antioxidantes, 200 mg de massa fresca foram macerados em nitrogênio líquido e homogeneizados em 1,5 mL do tampão de extração. Os homogeneizados foram centrifugados a 15.000 rpm., por 30 minutos, a 4 °C, coletando-se os sobrenadantes para as análises enzimáticas conforme apresentado por Biemelt, Keetman e Albrecht (1998).

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada pela capacidade de a enzima inibir a redução fotoquímica do nitro blue tetrazolium (NBT), proposta por Giannopolitis e Ries (1977). Os tubos contendo o tampão juntamente com a amostra, e o controle (meio de incubação sem a amostra), foram iluminados com lâmpada fluorescente de 20 W por 7 minutos e as leituras realizadas a 560 nm. Uma unidade de SOD é definida pela quantidade de enzima que inibe 50% da taxa de redução do NBT. A leitura foi feita a 560 nm em espectrofotômetro.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada pelo decréscimo na absorbância a 240 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio (Havir; Mchale, 1987). A reação foi iniciada pela adição do H_2O_2 ($\epsilon = 36 \text{ mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$). Uma unidade de CAT é definida pela quantidade de enzima necessária para decompor 1 $\mu\text{mol min}^{-1}$ de H_2O_2 .

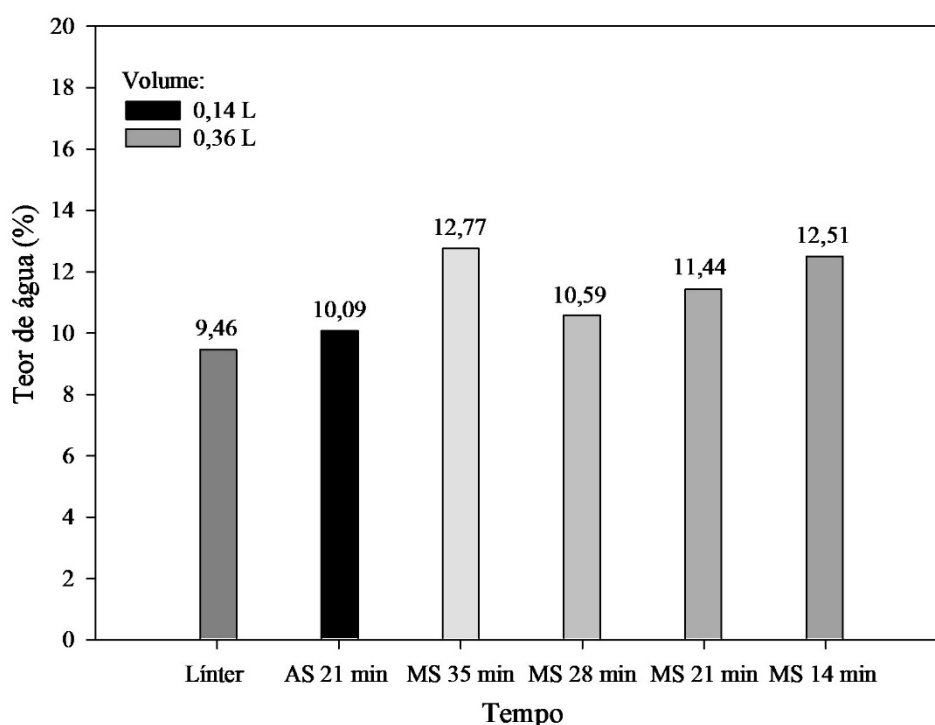
A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi determinada pela diminuição da absorbância do ascorbato ($\epsilon = 2,8 \text{ mM}^{-1} \text{cm}^{-1}$) a 290 nm a cada 15 segundos durante 3 minutos, segundo (Nakano; Asada, 1981). Uma unidade de APX é definida pela quantidade de enzima que oxida 1 $\mu\text{mol min}^{-1}$ de ácido ascórbico.

Para as análises bioquímicas, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado. Ressalta-se que cada repetição foi feita em triplicata, com quatro repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativas, aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade (R Core Team, 2024).

3 RESULTADOS

O teor de água das sementes de algodão está apresentado na Figura 1. Observaram-se variações nos valores médios de teor de água entre os tratamentos submetidos ao deslinteramento com ácido sulfúrico (AS) e ácido metanossulfônico (MS). Os dados evidenciam diferenças entre os tratamentos avaliados, expressas em porcentagem (%), conforme o tipo de ácido empregado no processo de deslinteramento.

Figura 1 – Porcentagem do teor de água de sementes de algodão antes (línter) e após o deslinteramento com ácido sulfúrico e ácido metanossulfônico ($0,36 \text{ L kg}^{-1}$) por diferentes tempos de revolvimento.

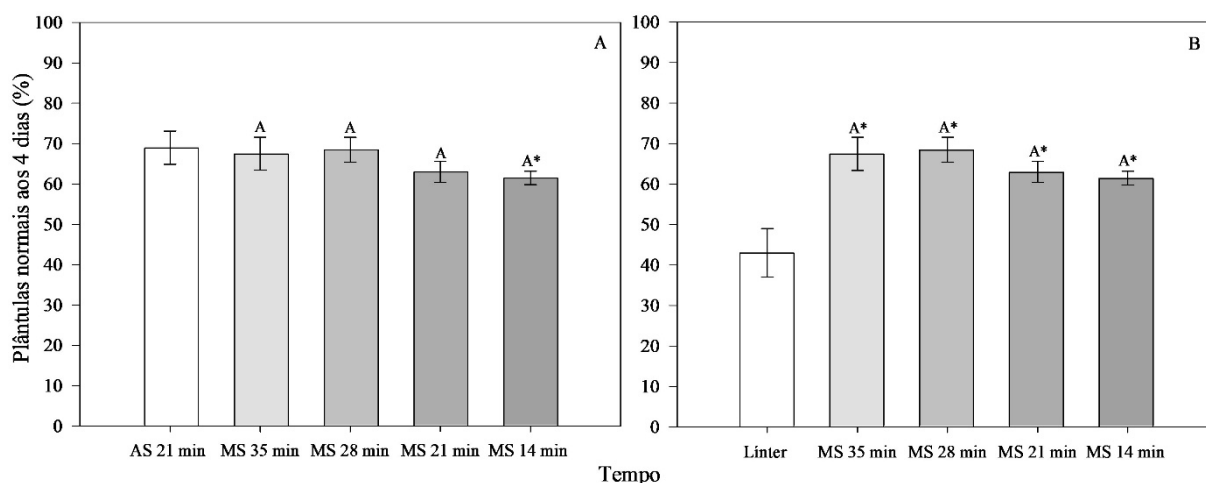


Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

Fonte: Da autora (2026).

Na primeira contagem do teste de germinação realizada aos 4 dias após a semeadura, observou-se que apenas o tempo de 14 minutos promoveu um deslinteramento inferior quando comparado ao deslinteramento com ácido sulfúrico (Figura 2A). Já quando comparados às sementes com línter (Figura 2B), todos os tratamentos foram superiores. Em ambas as situações, o deslinteramento com ácido metanossulfônico foi o mesmo, independente do tempo de revolvimento utilizado.

Figura 2 – Porcentagem de plântulas normais de algodão avaliadas na primeira contagem do teste de germinação, realizada aos 4 dias após a semeadura, de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com línter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

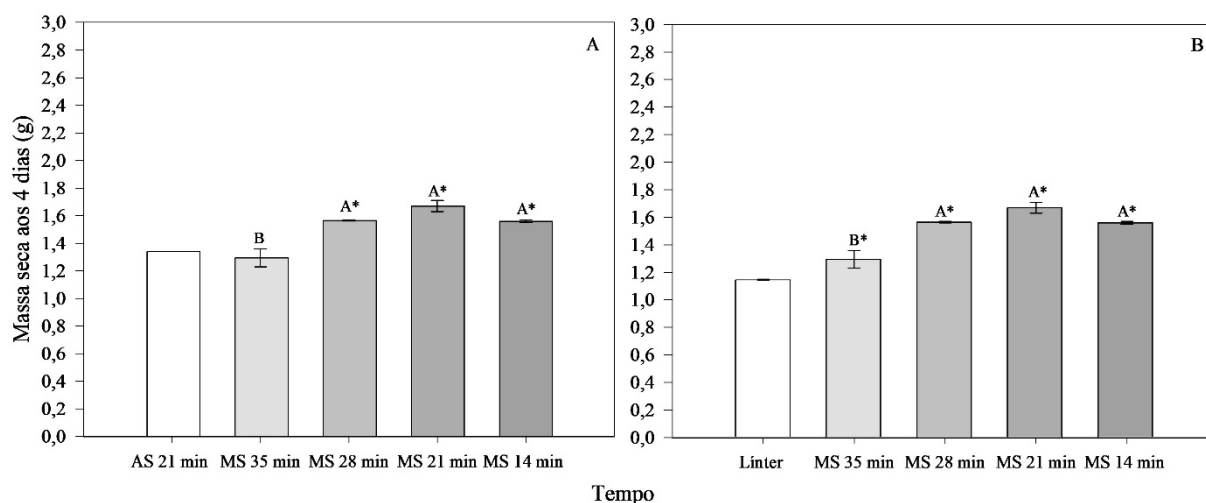
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

A massa seca de plântulas aos quatro dias após a semeadura encontra-se apresentada na Figura 3. Quando comparados os tempos de revolvimento entre si os três menores tempos de revolvimento proporcionaram maiores valores de massa seca do que o maior tempo utilizado. Quando comparados tanto com o controle positivo (Figura 3A) quanto com o controle negativo (Figura 3B) observou-se que os três menores tempos de revolvimento utilizados promoveram maiores valores de massa seca.

Figura 3 – Valores médios de massa seca, em gramas, de plântulas de algodão avaliadas na primeira contagem do teste de germinação, realizada aos 4 dias após a semeadura, provenientes de sementes deslindadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslindadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com línter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

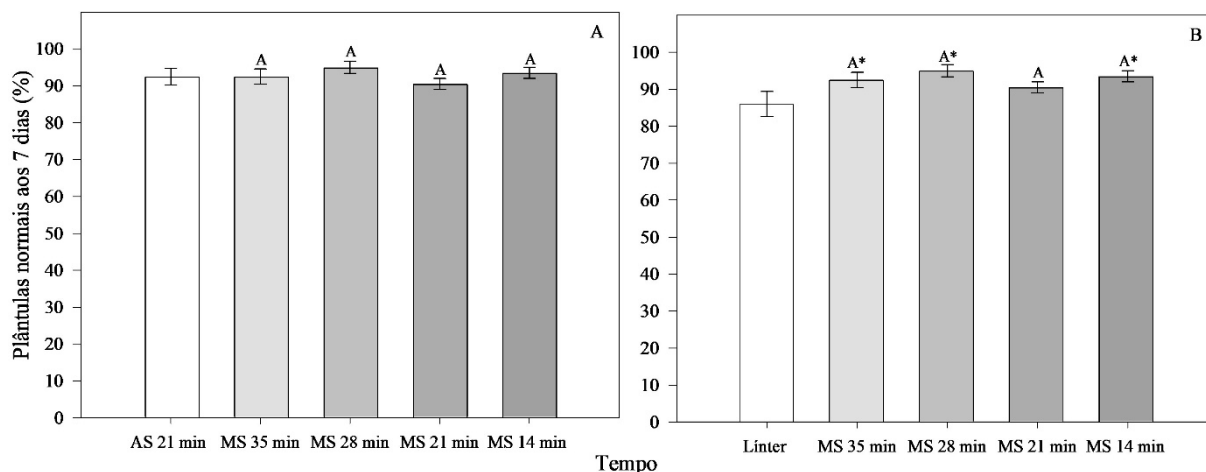
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Na contagem final do teste de germinação, quando comparados ao controle positivo (Figura 4A), independente do tempo de revolvimento utilizado, as porcentagens de plântulas normais foram iguais às observadas com o uso do ácido sulfúrico. Já para a comparação com o controle negativo (Figura 4B) os tempos de 35, 28 e 14 minutos proporcionaram maiores porcentagens de plântulas normais do que as sementes sem deslindamento. Quando comparados os volumes de ácido utilizado, não houve diferença entre os resultados obtidos independente do volume utilizado.

Figura 4 – Porcentagem de plântulas normais de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura, de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com linter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

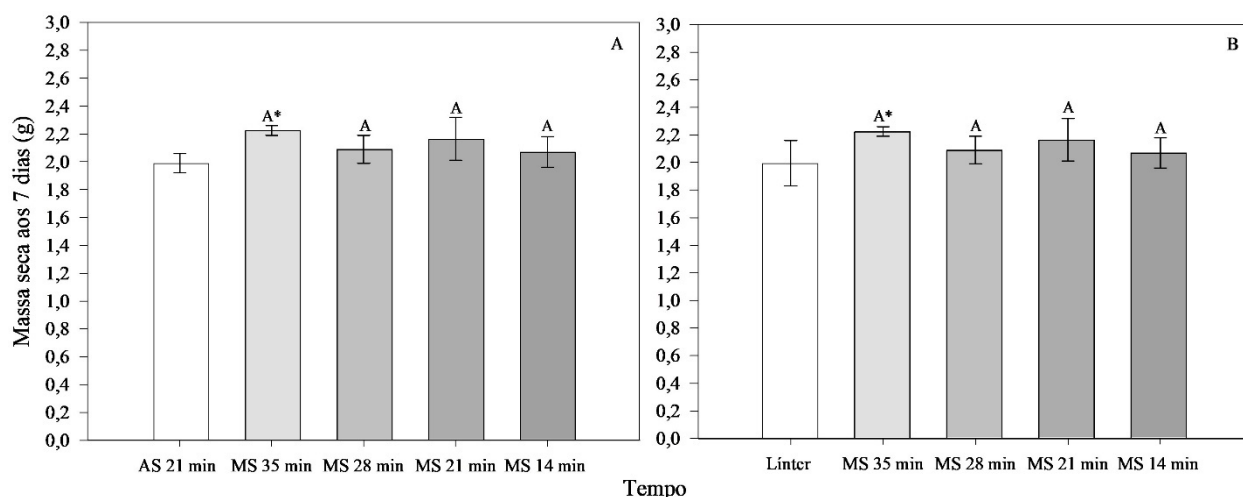
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para a massa seca na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura, observou-se o mesmo comportamento tanto para a comparação com o controle positivo (Figura 5A), quanto para o controle negativo (Figura 5B). Apenas o tempo de revolvimento de 35 minutos proporcionou resultados diferentes e superiores aos controles. Independente do volume utilizado, o resultado obtido para massa seca de plântulas foi o mesmo.

Figura 5 – Valores médios de massa seca, em gramas, de plântulas de algodão avaliadas na contagem final do teste de germinação, realizada aos 7 dias após a semeadura, provenientes de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com línter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

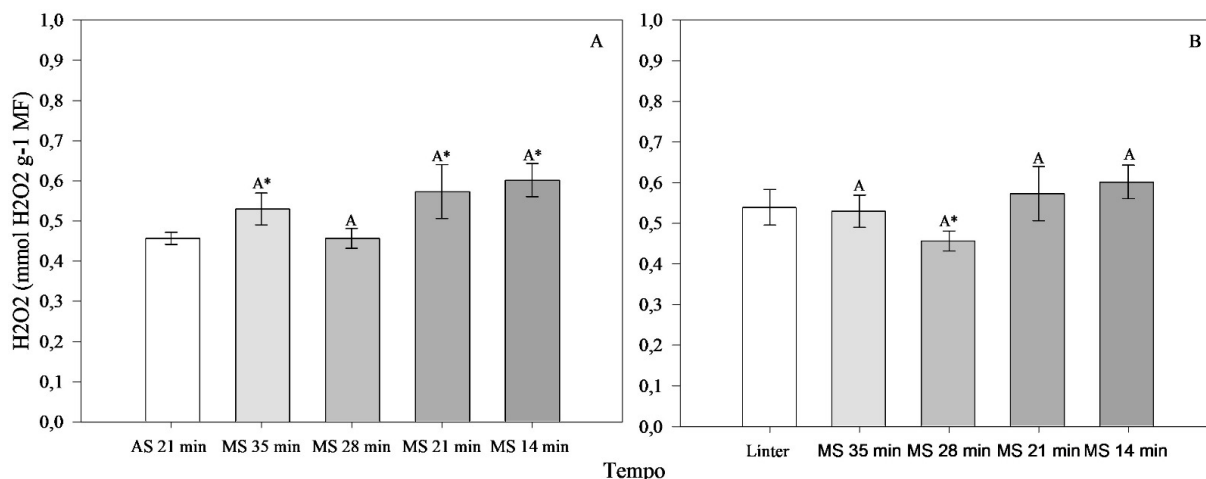
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para a quantificação de peróxido de hidrogênio (Figura 6) o tempo de revolvimento utilizado não interferiu nos valores observados. Quando comparados com o controle positivo (Figura 6A), os tempos de 35, 21 e 14 minutos promoveram maiores resultados. Já quando comparados ao controle negativo (Figura 6B) apenas o tempo de 21 minutos proporcionou resultado diferente e inferior ao observado no controle.

Figura 6 – Quantificação de peróxido de hidrogênio H_2O_2 ($\text{mmol H}_2\text{O}_2 \text{ g}^{-1} \text{ MF}$) em plântulas de algodão oriundas de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com linter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

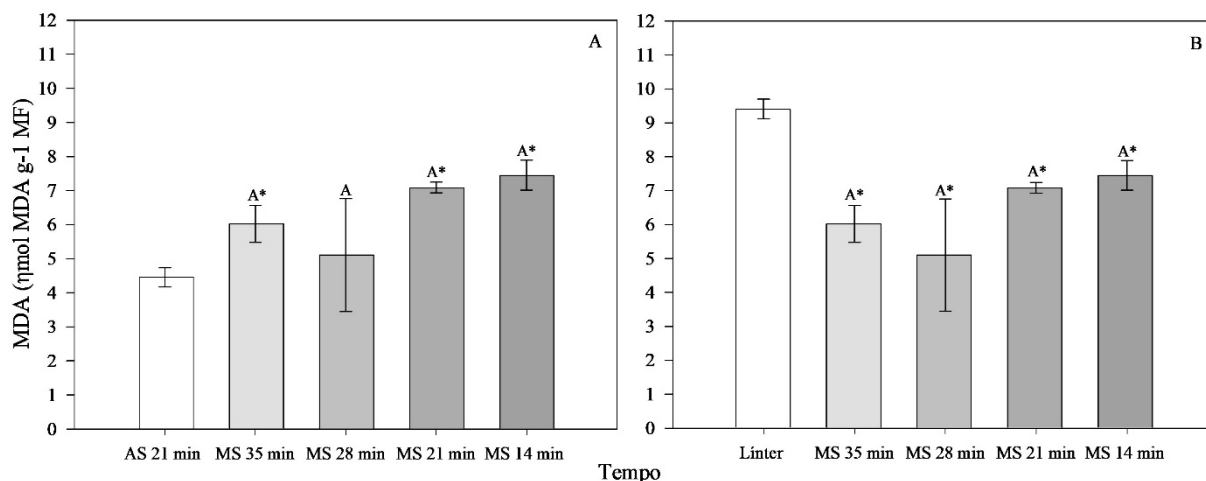
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Quanto a quantificação de malondialdeído (Figura 7), independente do tempo de revolvimento utilizado, o resultado obtido foi estatisticamente igual. Quando comparados ao controle positivo (Figura 7A) os volumes de 35, 21 e 14 minutos proporcionaram maiores resultados. Já quando comparados ao controle negativo (Figura 7B), todos os tratamentos proporcionaram resultados inferiores ao obtido no controle.

Figura 7 – Quantificação de malondialdeído - MDA ($\eta\text{mol MDA g}^{-1}\text{ MF}$) em plântulas de algodão oriundas de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com línter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

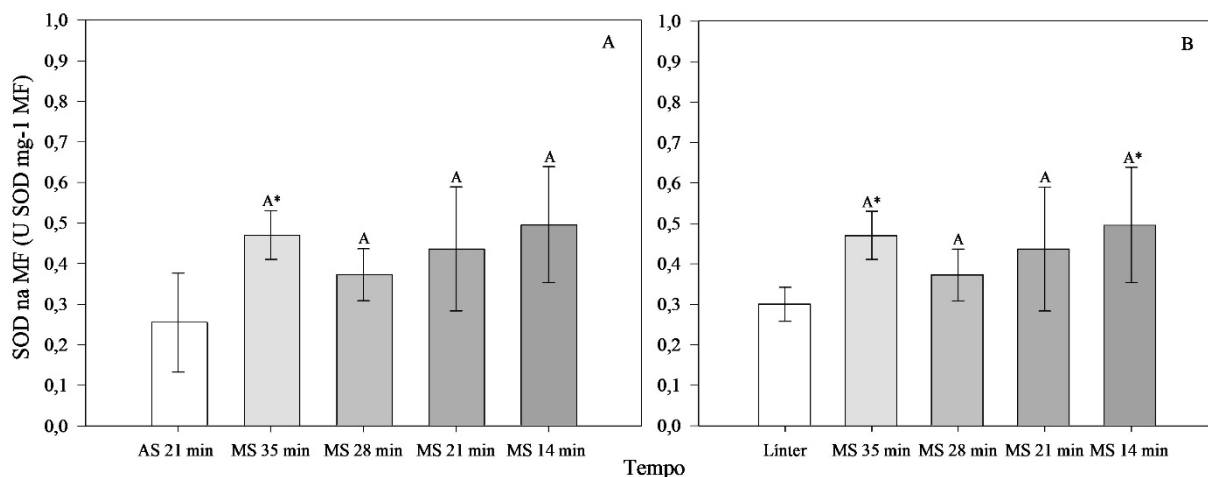
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para a quantificação de superóxido dismutase (Figura 8) o tempo de revolvimento não interferiu no resultado observado. Quando comparados os tratamentos com o uso de AS (Figura 8A), foi possível observar que apenas o tempo de 35 minutos proporcionou resultados estatisticamente superiores aos observados neste controle. Já para a comparação com as sementes com línter (Figura 8B), observou-se que o maior e o menor tempo de revolvimento proporcionaram valores de SOD superiores ao controle.

Figura 8 – Quantificação de superóxido dismutase - SOD (U SOD mg⁻¹ MF) em plântulas de algodão oriundas de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com línter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

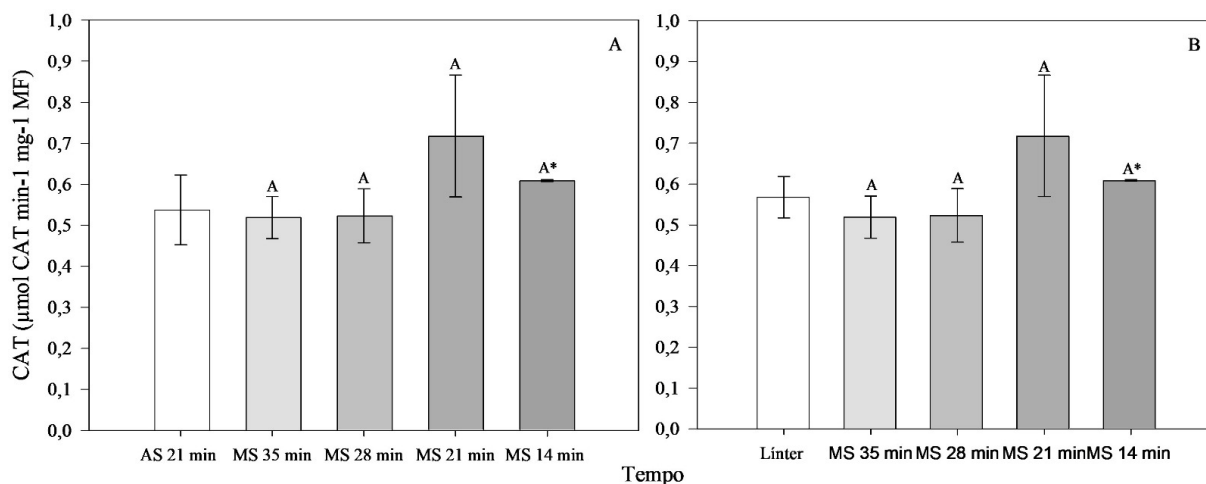
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Os resultados obtidos na quantificação da catalase estão apresentados na Figura 9, onde é possível observar que, mais uma vez, o tempo de revolvimento não interferiu nos resultados obtidos. Quando da comparação com o AS (Figura 9A), apenas o menor tempo interferiu na produção de CAT, proporcionando maiores valores. O mesmo foi observado quando comparados os diferentes tempos de revolvimento com as sementes não deslintadas (Figura 9B).

Figura 9 – Quantificação de catalase - CAT ($\mu\text{mol CAT min}^{-1} \text{mg}^{-1} \text{MF}$) em plântulas de algodão oriundas de sementes deslindadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslindadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com linter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

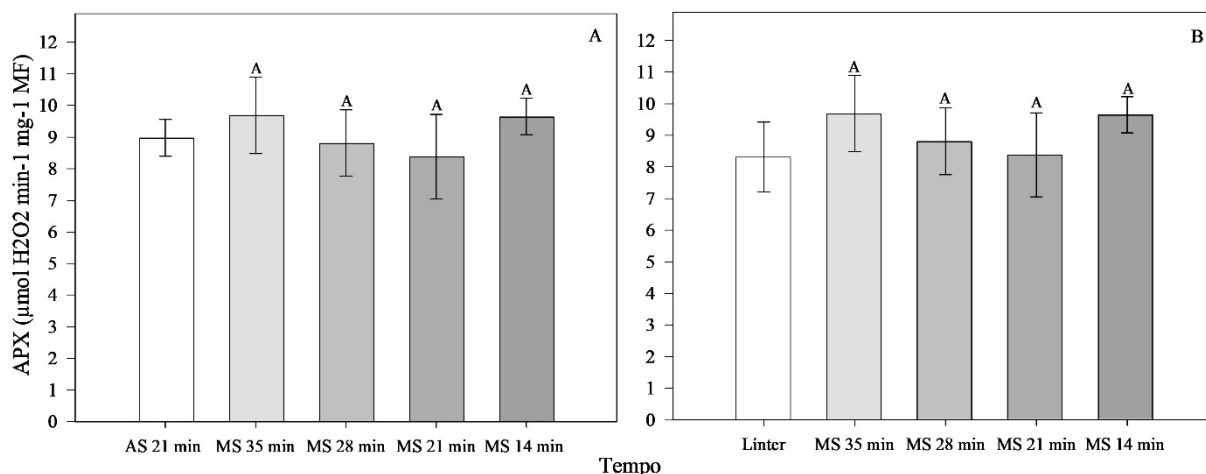
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnet ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Para a quantificação de ascorbato peroxidase, o mesmo comportamento foi observado tanto para a comparação com o controle positivo (Figura 10A) quanto para a comparação com o controle negativo (Figura 10B), onde não houve diferenças estatísticas para nenhum dos tempos utilizados.

Figura 10 – Quantificação de ascorbato peroxidase - APX ($\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{ min}^{-1} \text{ mg}^{-1} \text{ MF}$) em plântulas de algodão oriundas de sementes deslintadas com ácido metanossulfônico em diferentes tempos de revolvimento, em comparação com sementes deslintadas com ácido sulfúrico (A) e em comparação com sementes com línter (B).



Legenda: AS – ácido sulfúrico; MS – ácido metanossulfônico.

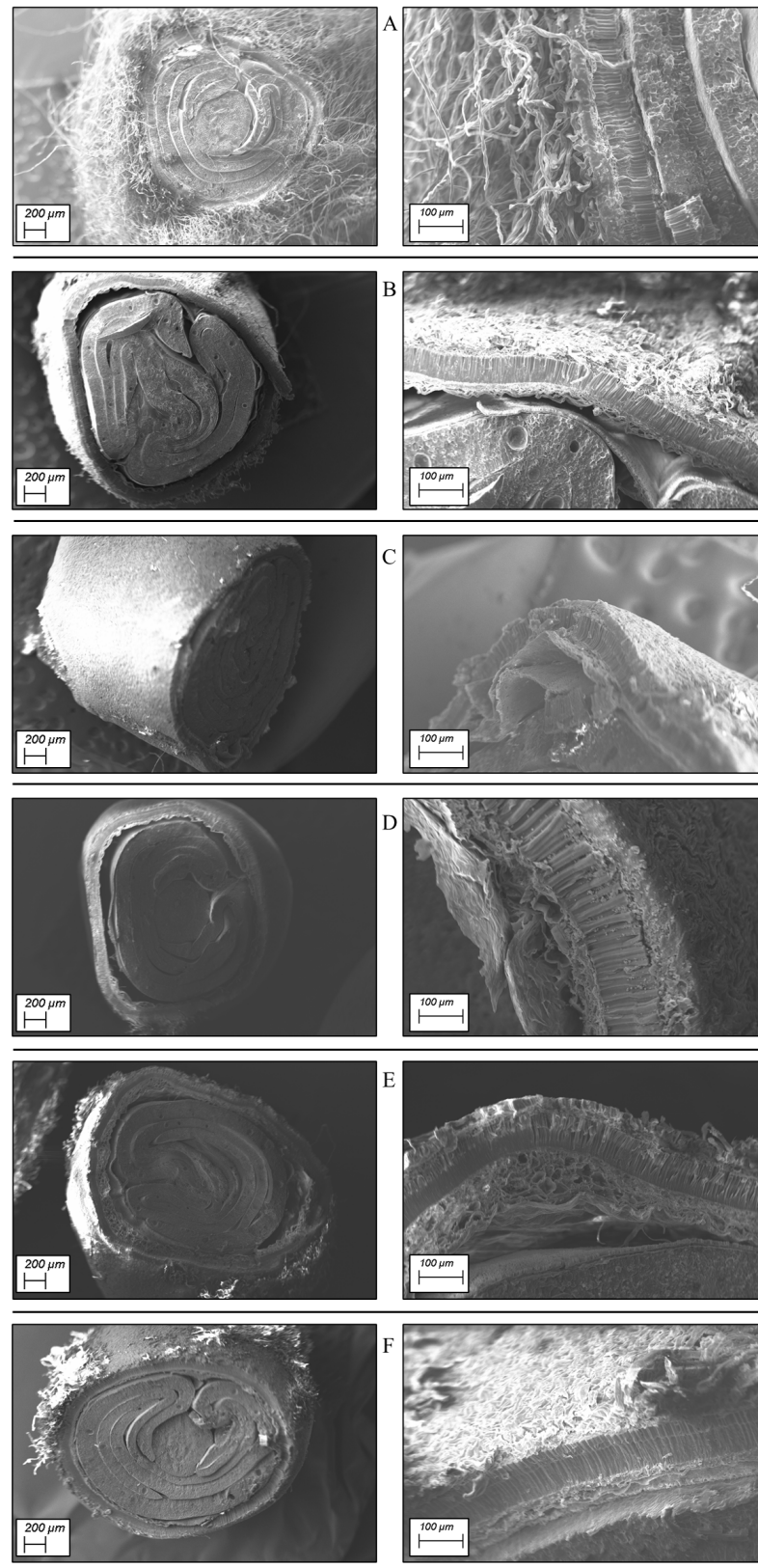
Médias seguidas de mesma letra maiúscula não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Tratamentos marcados com * apresentam efeito estatisticamente diferente do controle de acordo com o teste de Dunnett ao nível de 5% de significância.

Fonte: Da autora (2026).

Na figura 11 são apresentadas as imagens de microscopia eletrônica de varredura em sementes de algodão para todos os tratamentos. É válido ressaltar que o tegumento da semente de algodão é composto pela epiderme externa e interna, onde tem origem a fibra do algodão, camada paliçádica e mesofilo (Ryser *et. al*, 1988). O desgaste causado pelos ácidos sulfúrico e metanossulfônico utilizados no deslntamento foi visível somente na epiderme do tegumento, com a camada paliçádica e mesofilo não sendo afetados.

Figura 11 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura das sementes de algodão, em corte transversal, com linter (A), deslindadas com ácido sulfúrico (B) e deslindadas com MS pelos tempos de 35 min (C), 28 min (D), 21 min (E) e 14 min (F).



Fonte: Da autora (2026).

4 DISCUSSÃO

A massa seca de plântulas representa um indicador direto da eficiência de mobilização das reservas e do crescimento inicial do eixo embrionário. As diferenças observadas entre os tratamentos aos quatro dias após a semeadura indicam que o método de deslincamento exerce influência sobre o desempenho inicial das plântulas, possivelmente em função do grau de exposição do tegumento e da integridade dos tecidos embrionários.

Durante a germinação, a degradação e o transporte de reservas dependem da ativação coordenada de enzimas hidrolíticas e do equilíbrio metabólico do embrião (Marcos Filho, 2015). Processos de deslincamento excessivamente agressivos podem comprometer essa dinâmica, seja por danos diretos aos tecidos, seja pela indução de estresse fisiológico. Estudos anteriores relatam que tratamentos químicos adequadamente ajustados tendem a favorecer o crescimento inicial das plântulas, enquanto exposições inadequadas podem resultar em redução da massa seca acumulada (Santiago, 1978; Otazú, 1986).

A germinação final e a primeira contagem constituem parâmetros clássicos para avaliação da qualidade fisiológica de sementes, sendo amplamente utilizados em programas de controle de qualidade (ISTA, 2023). A primeira contagem, em particular, está associada ao vigor e à velocidade de germinação, permitindo discriminar diferenças sutis entre tratamentos.

As variações observadas nesses parâmetros em função do tipo de ácido utilizado no deslincamento indicam que o processo químico influencia não apenas a remoção do linter, mas também o desempenho fisiológico das sementes. O deslincamento químico é reconhecido por facilitar a embebição e reduzir barreiras físicas à germinação; entretanto, sua eficiência depende do equilíbrio entre remoção do linter e preservação da viabilidade do embrião (Vieira; Beltrão, 1999; Queiroga; Mata, 2018).

Resultados semelhantes foram reportados por Ferraz, Barros e Silva (1977) e Maeda *et al.* (1977), que destacam a importância do controle rigoroso das condições de deslincamento para evitar efeitos adversos sobre a germinação. Estudos mais recentes reforçam que ajustes finos no processo químico são determinantes para manter elevados níveis de germinação e vigor (Vaz-Tostes *et al.*, 2023; Maeda *et al.*, 2021).

O peróxido de hidrogênio é uma espécie reativa de oxigênio com dupla função no metabolismo vegetal, atuando tanto como molécula sinalizadora quanto como indicador de estresse oxidativo quando em concentrações elevadas (Gill; Tuteja, 2010). As variações nos teores de H_2O_2 observadas entre os tratamentos sugerem que o deslincamento químico pode modular o balanço redox das sementes durante a germinação.

A exposição a agentes químicos durante o processamento pode induzir a produção de espécies reativas de oxigênio, especialmente nas fases iniciais de embebição, quando ocorre intensa reativação metabólica (Bailly, 2004). Assim, diferenças no tipo de ácido e na intensidade do tratamento podem refletir diretamente nos níveis de H_2O_2 detectados.

O conteúdo de malondialdeído é amplamente utilizado como indicador da peroxidação lipídica e, conseqüentemente, da integridade das membranas celulares. Os resultados obtidos evidenciam que os tratamentos de deslincamento influenciam o grau de peroxidação lipídica durante o processo germinativo.

Danos às membranas celulares podem comprometer a compartimentalização metabólica e afetar negativamente o desempenho fisiológico das sementes (McDonald, 1999). Assim, a avaliação do MDA fornece subsídios importantes para compreender os efeitos subjacentes do deslincamento químico sobre a qualidade fisiológica das sementes de algodão.

A superóxido dismutase constitui a primeira linha de defesa contra o radical superóxido, catalisando sua conversão em peróxido de hidrogênio. As variações na atividade da SOD entre os tratamentos indicam ajustes do sistema antioxidante em resposta às condições impostas pelo deslincamento químico. Esse comportamento é consistente com o papel adaptativo da SOD frente a alterações no metabolismo oxidativo durante a germinação (Mittler, 2002).

A catalase desempenha papel central na decomposição do H_2O_2 , atuando principalmente em concentrações elevadas desse metabólito. Diferenças na atividade da CAT entre os tratamentos sugerem variações na eficiência do sistema antioxidante em mitigar o acúmulo de H_2O_2 , o que pode estar associado à intensidade do estresse imposto pelo processamento químico (Gill; Tuteja, 2010).

A ascorbato peroxidase integra o ciclo ascorbato–glutathione e atua no controle fino das concentrações de H_2O_2 em compartimentos celulares específicos. A atividade da APX observada nos tratamentos evidencia sua importância na manutenção do equilíbrio redox durante a germinação, especialmente em condições de estresse moderado (Foyer; Noctor, 2005).

A análise integrada dos parâmetros fisiológicos e bioquímicos evidencia que o desempenho das sementes de algodão submetidas ao deslincamento químico resulta da interação entre modificações físicas no tegumento, ativação metabólica durante a germinação e regulação do estresse oxidativo. Parâmetros como germinação, massa seca de plântulas e atividade antioxidante mostram-se interdependentes, reforçando a necessidade de avaliação multidimensional da qualidade fisiológica (Marcos Filho, 2015).

As alterações estruturais observadas por microscopia eletrônica de varredura explicam, em grande parte, os padrões de variação do teor de água e do desempenho fisiológico das sementes após o deslinteramento químico. Observou-se que sementes com linter apresentaram menor teor de água, indicando que, apesar do caráter higroscópico das fibras, a presença do linter atua como barreira física parcial à absorção de água pelo tegumento, restringindo a velocidade de embebição. Essa condição está associada à menor exposição direta das camadas externas do tegumento e da região chalazal, principal via de entrada de água na semente.

A remoção do linter pelo deslinteramento químico promove maior exposição das camadas do tegumento (Leahy, 1948), favorecendo maior absorção de água e resultando em teores de água superiores aos observados nas sementes com linter. No deslinteramento com ácido sulfúrico, essa exposição ocorre de forma mais homogênea, contribuindo para uma embebição mais controlada e melhor desempenho fisiológico. Por outro lado, o uso do ácido metanossulfônico em tempos prolongados intensifica as alterações na topografia do tegumento, especialmente na região chalazal, o que pode favorecer entrada rápida de água.

Segundo Christiansen e Moore (1959), a integridade da chalaza é determinante para o controle da permeabilidade hídrica em sementes de algodão. Alterações excessivas nessa região podem comprometer o equilíbrio da embebição e aumentar a susceptibilidade à desorganização das membranas celulares, refletindo negativamente no vigor. Conforme destacado por Mauney (1961; 1968), a preservação estrutural do tegumento assegura hidratação gradual do embrião e adequada transição metabólica da quiescência para a germinação.

Resultados semelhantes foram relatados por Vaz-Tostes (2021), no qual o autor destaca que não houve danos a camadas mais profundas do tegumento das sementes de algodão, pós-deslinteramento com ácido sulfúrico.

Diante de todo o exposto, os resultados demonstram que menores teores de água observados nas sementes com linter e nos tratamentos que preservaram a integridade do tegumento estão associados a maior controle da embebição e melhor desempenho fisiológico. O deslinteramento eficiente deve, portanto, equilibrar a remoção do linter com a manutenção da estrutura anatômica do tegumento, garantindo sementes com absorção hídrica regulada, menor teor de água e maior vigor.

Sendo assim, os resultados obtidos indicam que o ácido metanossulfônico apresenta potencial como alternativa ao ácido sulfúrico no deslinteramento de sementes de algodão. A comparação entre os tratamentos evidencia que ácidos alternativos podem promover remoção eficiente do linter sem comprometer, de forma significativa, os parâmetros fisiológicos, bioquímicos e estruturais avaliados (Vaz-Tostes *et al.*, 2025; Queiroga; Mata, 2018).

5 CONCLUSÕES

O tempo de revolvimento de 28 minutos do ácido metanossulfônico para o deslincamento de sementes de algodão se mostrou mais eficiente.

O deslincamento químico influencia o desempenho fisiológico e bioquímico das sementes de algodão.

O ácido metanossulfônico apresenta desempenho equivalente ao ácido sulfúrico quanto à germinação, vigor, respostas antioxidantes e desgaste do tegumento restrito à epiderme.

O ácido metanossulfônico é alternativa viável ao ácido sulfúrico para o deslincamento de sementes de algodão.

REFERÊNCIAS

- BAILLY, C. Active oxygen species and antioxidants in seed biology. **Seed Science Research**, v. 14, n. 2, p. 93-107, 2004.
- BAILLY, C.; EL-MAAROUF-BOUTEAU, H.; CORBINEAU, F. From intracellular signaling networks to cell death: the dual role of reactive oxygen species in seed physiology. **Comptes Rendus. Biologies**, v. 331, n. 10, p. 806-814, 2008.
- BARYLA A. *et al.* Evaluation of lipid peroxidation as a toxicity bioassay for plants exposed to copper. **Environmental Pollution**, v. 109, p.131-135, 2000.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following Hypoxia or Anoxia leads to Activation of the Antioxidative Defense System in Roots of Wheat Seedlings. **Plant Physiology**, v. 116, p. 651-658, 1998.
- BRASIL. Regras para Análise de Sementes. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA)**, 399 p., 2009.
- CHRISTIANSEN, M. N.; MOORE, R. P. Seed coat structural differences that influence water uptake and seed quality in hard seed cotton. **Agronomy Journal**, v. 51, p. 582-584, 1959.
- DEMIDCHIK, V. Mechanisms of oxidative stress in plants: from classical chemistry to cell biology. **Environmental and Experimental Botany**, v. 109, p. 212-228, 2015.
- DHINDSA R. H.; DHINDSA P.; THORPE T. A. Leaf senescence: Correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased level of SOD and CAT. **Journal of Experimental Botany**. v. 32, p. 93-101, 1981.
- DOWD, M. K.; MANANDHAR, R.; DELHOM, C. D. Effect of seed orientation, acid delinting, moisture level, and Sample type on cottonseed fracture resistance. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, v. 64, p.1045-1053, 2019.
- FERRAZ, E. C.; BARROS, A. S. R.; SILVA, W. R. Influência do deslintamento químico e mecânico na qualidade fisiológica de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v. 1, n. 2, p. 17-24, 1977.
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Oxidant and antioxidant signalling in plants: a re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context. **Plant, Cell & Environment**, v. 28, n. 8, p. 1056-1071, 2005.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 12, p. 909–930, 2010.
- HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**. v. 84, p. 450-455, 1987.
- ISTA. International Rules for Seed Testing 2023. **International Seed Testing Association**, 2023.

JOSEPH, P. B.; KENNETH, L. Z. **Composição e método para deslintamento de sementes de algodão**. Depositante: BASF SE. BR nº 112016020372-0 B. Depósito: 03 mar. 2015. Concessão: 18 jan. 2022. 2015

LEAHY, J. Structure of the cottonseed. *In*: BAILEY, A. E. (ed.). **Cottonseed and cottonseed products: their chemistry and chemical technology**, p. 105-116, 1948.

LIMA, J. M. E. *et al.* Delinting and neutralizers residue effect on stored cotton seeds physiological quality determined by phenotyping image analysis. **Journal of Seed Science**, v. 45, p. e202345014, 2023.

MAEDA, A. B. *et al.* Stories from the greenhouse -a brief on cotton seed germination. **Plants**, v. 10, p. 2807, 2021.

MARCOS FILHO, J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. **ABRATES**, 2. ed., 2015.

MAUNEY, J. R. Morphology of the cotton plant. *In*: ELIOT, F. C.; HOOVER, M.; PORTER JR., W. K. (eds.). **Advances in production and utilization of quality cotton**, 1968.

MAUNEY, J. R. The culture in vitro of immature cotton embryos. **Botanical Gazette**, v. 122, p. 205-209, 1961.

McDONALD, M. B. Seed deterioration: physiology, repair and assessment. **Seed Science and Technology**, v. 27, n. 1, p. 177–237, 1999.

MITTLER, R. *et al.* ROS signaling: the new wave? **Trends in Plant Science**, v.16, n. 6, p. 300-309, 2011.

MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant & Cell Physiology**. v. 22, p. 867-880, 1981.

OTAZÚ, C. S. I. Efeito de métodos de deslintamento sobre o comportamento de sementes de algodão (*Gossypium hirsutum* L.) no armazenamento. **Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo**, Piracicaba, 1986.

QUEIROGA, V. P.; MATA, M. E. R. M. C. Métodos de deslintamento apropriados para sementes de algodão orgânicas e convencionais. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 20, n. 1, p. 83-101, 2018.

R CORE TEAM. R: A Language and Environment for Statistical Computing. **R Foundation for Statistical Computing**, 2024.

RYSER, U. *et al.* Ultrastructure of the FringeLayer, the innermost epidermis of cotton seed coats. **Protoplasma**, v. 147, p. 81-90, 1988.

SANTIAGO, I. M. Influência do deslintamento à flama e químico sobre a germinação, o vigor e o desempenho no campo de sementes de algodoeiro (*Gossypium hirsutum* L.).

Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1978.

TOSTES, D. P. V. *et al.* Neutralization of cotton seeds after chemical delinting. **Water Air And Soil Pollution**, v. 234, 16 p., 2023.

VAZ-TOSTES, D. P. Deslintamento químico: efeitos sobre a qualidade de sementes de algodão. **Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras**, Lavras, 64 f., 2021.

VAZ-TOSTES, D. P. *et al.* Image analysis as cotton seed chemical delinting evaluation tool. **Multimedia Tools and Applications**, v. 84, n. 26, p. 30851-30864, 2025.

VIEIRA, R. M.; BELTRÃO, N. E. de M. Produção de sementes de algodão. *In*: BELTRÃO, N. E. de M. (Org.). O agronegócio do algodão no Brasil. **Embrapa Informação Tecnológica**, p. 430-453, 1999.

TERCEIRA PARTE

2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora o ácido sulfúrico apresente comportamento mais previsível e permaneça como referência consolidada no processo de deslintamento de sementes de algodão, os resultados obtidos ao longo deste estudo demonstram que o ácido metanossulfônico, quando criteriosamente ajustado em termos de dose e tempo de exposição, é capaz de alcançar desempenho equivalente ou superior ao método tradicional. Destaca-se, sobretudo, sua eficiência na promoção do vigor inicial das plântulas, sem ocasionar prejuízos à germinação final, o que reforça sua aplicabilidade prática em sistemas de produção.

Do ponto de vista fisiológico e bioquímico, as respostas antioxidantes observadas indicam a manutenção do equilíbrio redox durante a germinação, sugerindo que o tratamento com ácido metanossulfônico não causa estresse oxidativo significativo nas sementes. Esse comportamento é corroborado pela preservação da atividade de sistemas enzimáticos relacionados à defesa antioxidante, refletindo condições favoráveis ao estabelecimento inicial das plântulas.

As análises estruturais evidenciam que o desgaste promovido no tegumento das sementes de algodão ocorre de forma controlada e restrita à epiderme, sem comprometimento das camadas internas. Esse resultado é particularmente relevante, pois demonstra que o processo de deslintamento com ácido metanossulfônico mantém a integridade estrutural do tegumento, fator diretamente associado à conservação da qualidade fisiológica das sementes.

Nesse contexto, o ácido metanossulfônico consolida-se como uma alternativa tecnicamente viável ao ácido sulfúrico, reunindo características desejáveis como eficiência no deslintamento, menor agressividade química, redução do potencial de danos aos equipamentos e maior segurança operacional. Além disso, sua utilização está alinhada com demandas que buscam por processos mais sustentáveis, ao possibilitar a redução de riscos ambientais e ocupacionais.

Portanto, os resultados desta tese contribuem de forma significativa para o avanço do conhecimento na área de tecnologia de sementes, ao propor uma alternativa inovadora e segura para o deslintamento de sementes de algodão. A adoção do ácido metanossulfônico tem potencial para promover melhorias nos protocolos de beneficiamento, ampliando a eficiência, a sustentabilidade e a previsibilidade dos processos, com impactos positivos para a cadeia produtiva do algodão.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. **Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013**. Estabelece padrões para produção e comercialização de sementes de algodão. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2013.
- BRASIL. **Lei nº 10.711, de 5 de agosto de 2003**. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Sementes e Mudas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2003.
- BRUNETTA, E.; BRUNETTA, P. S. F. Produção de sementes de algodão. *In*: FREIRE, E. C. Algodão no Cerrado do Brasil. **ABRAPA**, 2015.
- CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de algodão: grãos – safra 2025/26, 4º levantamento. **Companhia Nacional de Abastecimento**, v. 13, n. 4, 108 p., 2026. Disponível em: < <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/4o-levantamento-safra-2025-26/4o-levantamento-safra-2025-26> >. Acesso em: 12 jan. 2026.
- JOSEPH, P. Borst; KENNETH, L. Zack. **Composição e método para deslintamento de sementes de algodão**. Depositante: BASF SE. BR nº 112016020372-0 B. Depósito: 03 mar. 2015. Concessão: 18 jan. 2022. 2015
- MARCOS FILHO, J. Fisiologia de sementes de plantas cultivadas. **ABRATES**, 2. ed., 2015.
- USDA. Cotton: world markets and trade. **United States Department of Agriculture**, 31 p., 2025. < <https://www.fas.usda.gov/data/cotton-world-markets-and-trade-08122025> >. Acesso em: 12 jan. 2026.
- USDA. Cotton: world markets and trade. **United States Department of Agriculture**, 30 p., 2026. < <https://www.fas.usda.gov/data/cotton-world-markets-and-trade-01122026> >. Acesso em: 12 jan. 2026.