



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

PABLO FERREIRA DA SILVA

**DESEMPENHO FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE *Cenostigma pyramidale* (Tul.)
Gagnon & G.P. Lewis SOB ESTRESSES ABIÓTICOS E TRATAMENTOS PRÉ-
GERMINATIVOS**

MOSSORÓ

2025

PABLO FERREIRA DA SILVA

**DESEMPENHO FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE *Cenostigma pyramidale* (Tul.)
Gagnon & G.P. Lewis SOB ESTRESSES ABIÓTICOS E TRATAMENTOS PRÉ-
GERMINATIVOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Linha de Pesquisa: Estratégias do desenvolvimento sustentável do semiárido

Orientadora: Profa. Dra. Clarisse Pereira Benedito

Coorientador: Prof. Dr. Salvador Barros Torres

MOSSORÓ

2025

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

S586 Silva, Pablo Ferreira da.
d Desempenho fisiológico de sementes de
Cenostigma pyramidale (Tul) Gagnon & G.P. Lewis
sob estresses abióticos e tratamentos pré-
germinativos. / Pablo Ferreira da Silva. - 2025.
75 f. : il.

Orientadora: Clarisse Pereira Benedito.
Coorientador: Salvador Barros Torres.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2025.

1. catingueira. 2. salinidade. 3. déficit
hídrico. 4. atenuadores. I. Benedito, Clarisse
Pereira, orient. II. Torres, Salvador Barros, co-
orient. III. Título.

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

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

PABLO FERREIRA DA SILVA

DESEMPENHO FISIOLÓGICO DE SEMENTES DE *Cenostigma pyramidale* (Tul.)
Gagnon & G.P. Lewis SOB ESTRESSES ABIÓTICOS E TRATAMENTOS PRÉ-GERMINATIVOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Linha de Pesquisa: Estratégias do desenvolvimento sustentável do semiárido

Defendida em: 31/ 07/ 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



CLARISSE PEREIRA BENEDITO

Data: 08/08/2025 14:44:25-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Clarisse Pereira Benedito (UFERSA)
Orientadora - Presidente

Documento assinado digitalmente



SALVADOR BARROS TORRES

Data: 08/08/2025 14:33:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Salvador Barros Torres (EMPARN/UFERSA)
Coorientador

Documento assinado digitalmente



JAILMA SUERDA SILVA DE LIMA

Data: 08/08/2025 20:09:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Jailma Suerda Silva de Lima (UFERSA)
Membro Interno

Documento assinado digitalmente



GARDENIA SILVANA DE OLIVEIRA RODRIGUES

Data: 08/08/2025 22:51:16-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^ª. Dr^ª. Gardênia Silvana de Oliveira Rodrigues (SEEC-EEGR)
Membro Externo

À minha família, pelo alicerce de amor, apoio e inspiração que construíram quem sou hoje. A cada sorriso, palavra de incentivo e sacrifício silencioso, levo vocês comigo nesta conquista e em todas as que ainda virão.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e por nunca me desamparar, mesmo diante das minhas falhas. A Ele toda honra e toda glória, pois, se não fosse por Sua presença, eu não estaria aqui hoje.

À minha família, em especial à minha mãe, Ivaneide Porpino, por suas incansáveis orações que me fortaleceram na busca pelos meus sonhos e me ajudaram a não desistir; ao meu pai Paulo Ferreira; meus irmãos, Paulo Filho e Patrik Ferreira; e aos meus sobrinhos, Pietro Ferreira e Pierre Ferreira, por se fazerem presentes, mesmo na distância. Amo muito vocês.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em especial ao Programa de Pós-graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade (PPGATS), pela oportunidade de cursar o mestrado. Sou grato pela formação, suporte e aprendizado ao longo dessa jornada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido durante o mestrado, fundamental para a minha dedicação acadêmica. Esse incentivo contribuiu diretamente para minha formação como pesquisador.

Agradeço à minha orientadora, Prof.^a. Dr.^a. Clarisse Pereira, pelo apoio, orientação, e dedicação ao longo da caminhada, fundamentais para a produção deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

À coorientação do Prof. Dr. Salvador Barros, pelo apoio, contribuições e disponibilidade durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca, Prof.^a. Dr.^a. Jailma Suerda e Prof.^a. Dr.^a. Gardênia Silvana pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições na avaliação desta dissertação.

Agradeço aos técnicos do Laboratório de Análises de Sementes (LAS), Francisco César e, em especial, Sara Monalisa, pela atenção, dedicação e colaboração durante a realização deste trabalho.

Aos amigos do laboratório e agregados, meus sinceros agradecimentos por tornarem os meus dias mais leves, menos nublados e repleto de boas risadas, apoio e companheirismo. Em especial a Emanuele Lucas, Iracema Paiva, Daise Rocha, Jéssica Christie, Giovanna Dias, Valéria Nayara, Angie Alejandra, Talissa Quitério, Luanna Fernandes, Carlos Eduardo e Antônia Yasmim, por cada gesto de amizade, incentivo e pelas contribuições durante essa caminhada.

Aos meus amigos, Mariana Moraes, Lucca Araújo e Andressa Silvestre pelos momentos de descontração, apoio e incentivo.

Agradeço a Prof.^a. Dra. Luciana Angélica por ser uma de minhas apoiadoras em minha jornada acadêmica.

Ao meu grande amigo Lázaro Luís, agradeço pelos ensinamentos, conselhos sinceros e, pelo apoio emocional nos momentos difíceis. Seu incentivo fez toda a diferença nesta jornada.

E, por fim, agradeço a todos aqueles que, de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Com gratidão, encerro esta etapa, certo de que não cheguei aqui sozinho.

GRATIDÃO.

“Temos que continuar aprendendo. Temos que estar abertos. E temos que estar prontos para espalhar nosso conhecimento a fim de chegar a uma compreensão mais elevada da realidade.”

Thich Nhat Hanh

RESUMO

Ferreira da Silva, Pablo. **Desempenho fisiológico de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul) Gagnon & G.P. Lewis sob estresses abióticos e tratamentos pré-germinativos**. 2025. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente, Tecnologia e Sociedade) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN, 2025.

Espécies florestais do ecossistema Caatinga, como *Cenostigma pyramidale* (Tul) Gagnon & G.P. Lewis, desempenham papel fundamental na manutenção e recomposição de áreas degradadas, na realização de reflorestamentos e no combate à desertificação, além de possuírem relevância social e econômica. No entanto, fatores abióticos como salinização do solo e da água, bem como o déficit hídrico, podem comprometer o crescimento e o metabolismo das plântulas dessa espécie durante as fases iniciais de desenvolvimento. Diante disso, objetivou-se avaliar o desempenho fisiológico de sementes de *C. pyramidale* sob condições de estresses abióticos e submetidas a tratamentos pré-germinativos. Foram realizados dois experimentos no Laboratório de Análise de Sementes da UFERSA, com sementes de catingueira oriundas do Parque Nacional da Fuma Feia. O primeiro experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3×6 , sendo o primeiro fator composto por três tipos de sais (NaCl, CaCl₂ e KCl), e o segundo, por seis níveis de salinidade (0,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; e 25,0 dS m⁻¹), com quatro repetições de 25 sementes cada. O segundo experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com os seguintes tratamentos: T1 (controle), T2 (-0,1 MPa), T3 (-0,2 MPa), T4 (-0,1 MPa + ácido salicílico), T5 (-0,2 MPa + ácido salicílico), T6 (-0,1 MPa + ácido giberélico), T7 (-0,2 MPa + ácido giberélico), T8 (-0,1 MPa + hidrocondicionamento) e T9 (-0,2 MPa + hidrocondicionamento), com quatro repetições de 25 sementes cada. As sementes dos tratamentos T4 e T5 foram submetidas à pré-embebição por 12 horas em ácido salicílico (1 mM L⁻¹); T6 e T7, em ácido giberélico (0,5 mM L⁻¹); e T8 e T9, em água destilada (hidrocondicionamento). As variáveis analisadas em ambos os experimentos foram: germinação, primeira contagem de germinação, índice de velocidade de germinação, comprimento da parte aérea e da raiz, massa seca da parte aérea e da raiz das plântulas, além dos teores de açúcares solúveis totais, aminoácidos livres totais e prolina livre. No primeiro experimento, o sal NaCl foi o que mais comprometeu o desenvolvimento das plântulas, com alterações significativas a partir de 5 dS m⁻¹. Os teores de açúcares solúveis e aminoácidos livres tiveram elevações significativas em resposta ao NaCl, enquanto a prolina acumulou-se progressivamente sob estresse provocado por KCl. No segundo experimento, o déficit hídrico no potencial mais brando (-0,1 MPa) comprometeu o vigor das plântulas de *C. pyramidale*, mas esse efeito foi atenuado com a aplicação de hidrocondicionamento e ácido giberélico. Os atenuadores aumentaram os teores de açúcares solúveis, aminoácidos livres e prolina, com destaque para o ácido salicílico, que obteve os melhores resultados bioquímicos.

Palavras-chave: Catingueira, salinidade, déficit hídrico, atenuadores.

ABSTRACT

Ferreira da Silva, Pablo. **Physiological performance of *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis seeds under abiotic stresses and pre-germinative treatments.** 2025. 75. f. Dissertation (Master's in Environment, Technology and Society) – Federal Rural University of the Semi-Arid Region (UFERSA), Mossoró, RN, 2025.

Forest species of the Caatinga ecosystem, such as *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis, play a fundamental role in maintaining and restoring degraded areas, implementing reforestation, and combating desertification, in addition to having social and economic relevance. However, abiotic factors such as soil and water salinization, as well as water deficit, can compromise the growth and metabolism of this species' seedlings during the initial stages of development. Therefore, the objective was to evaluate the physiological performance of *C. pyramidale* seeds under abiotic stress conditions and subjected to pre-germination treatments. Two experiments were conducted at the UFERSA Seed Analysis Laboratory using catingueira seeds from Furna Feia National Park. The first experiment was conducted in a completely randomized design, in a 3×6 factorial scheme, with the first factor consisting of three types of salts (NaCl, CaCl₂ and KCl), and the second, of six salinity levels (0.0; 5.0; 10.0; 15.0; 20.0; and 25.0 dS m⁻¹), with four replicates of 25 seeds each. The second experiment was conducted in a completely randomized design, with the following treatments: T1 (control), T2 (-0.1 MPa), T3 (-0.2 MPa), T4 (-0.1 MPa + salicylic acid), T5 (-0.2 MPa + salicylic acid), T6 (-0.1 MPa + gibberellic acid), T7 (-0.2 MPa + gibberellic acid), T8 (-0.1 MPa + hydropriming) and T9 (-0.2 MPa + hydropriming), with four replicates of 25 seeds each. Seeds from treatments T4 and T5 were pre-soaked for 12 hours in salicylic acid (1 mM L⁻¹); T6 and T7, in gibberellic acid (0.5 mM L⁻¹); and T8 and T9, in distilled water (hydropriming). The variables analyzed in both experiments were: germination, first germination count, germination speed index, shoot and root length, shoot and root dry matter of seedlings, and total soluble sugar, total free amino acid, and free proline levels. In the first experiment, NaCl most affected seedling development, with significant changes starting at 5 dS m⁻¹. Soluble sugar and free amino acid levels increased significantly in response to NaCl, while proline progressively accumulated under KCl stress. In the second experiment, water deficit at a milder potential (-0.1 MPa) compromised *C. pyramidale* seedling vigor, but this effect was attenuated by the application of hydropriming and gibberellic acid. The attenuators increased the levels of soluble sugars, free amino acids, and proline, with salicylic acid being the most effective biochemically.

Keywords: Catingueira, salinity, water deficit, attenuators.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 – ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE *Cenostigma pyramidale* (Tul) Gagnon & G.P. Lewis EM RESPOSTA AO ESTRESSE SALINO

- Figura 1:** Germinação (A), primeira contagem (B) e índice de velocidade de germinação (C) de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao estresse salino com diferentes agentes osmóticos. Mossoró-RN, 2025.....38
- Figura 2:** Comprimento da parte aérea (A), comprimento da raiz (B), massa seca da parte aérea (C) e massa seca da raiz (D) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao estresse salino. Mossoró-RN, 2025.....42
- Figura 3:** Açúcares solúveis totais (AST) (A), aminoácidos livres totais (ALT) (B) e prolina livre (PL) (C) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao estresse salino. Mossoró-RN, 2025.46

CAPÍTULO 3 – TRATAMENTOS PRÉ-GERMINATIVOS EM SEMENTES DE *Cenostigma pyramidale* (TUL) GAGNON & G.P. LEWIS PARA ATENUAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO

- Figura 1:** Determinação da curva da embebição em sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis. Mossoró-RN, 2025.....59
- Figura 2:** Germinação (A), primeira contagem de germinação (B) e índice de velocidade de germinação (C) de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.....63
- Figura 3:** Comprimento da parte aérea (A), comprimento da raiz (B), massa seca da parte aérea (C) e massa seca da raiz (D) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.....66
- Figura 4:** Açúcares solúveis totais (A), aminoácidos livres totais (B) e prolina (C) livre de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.....70

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE *Cenostigma pyramidale* (Tul) Gagnon & G.P. Lewis EM RESPOSTA AO ESTRESSE SALINO

Tabela 1. Resumo da análise de variância para germinação (G), primeira contagem (PC), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR) em plântulas de <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob estresse salino. Mossoró-RN, 2025	37
Tabela 2. Médias de germinação (G), primeira contagem (PC), e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis em função de diferentes sais e potenciais osmóticos. Mossoró-RN, 2025.....	39
Tabela 3. Médias do comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR) de plântulas de <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis em função de diferentes sais e potenciais osmóticos. Mossoró-RN, 2025	41
Tabela 4. Resumo da análise de variância para açúcares solúveis totais (AST), aminoácidos livres totais (ALT) e prolina livre (PL) em plântulas de <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob estresse salino. Mossoró-RN, 2025.....	44
Tabela 5. Médias de açúcares solúveis totais (AST), aminoácidos livres totais (ALT) e prolina livre (PL) de plântulas de <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis em função de diferentes sais e potenciais osmóticos. Mossoró-RN, 2025	47

CAPÍTULO 3 – TRATAMENTOS PRÉ-GERMINATIVOS EM SEMENTES DE *Cenostigma pyramidale* (TUL) GAGNON & G.P. LEWIS PARA ATENUAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO

Tabela 1. Resumo da análise de variância para germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR) em plântulas de <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.....	62
--	----

Tabela 2. Resumo da análise de variância para açúcares solúveis totais (AST), aminoácidos livres totais (ALT) e prolina livre (PL) em plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.....68

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	16
INTRODUÇÃO GERAL E REFERENCIAL TEÓRICO	16
1. INTRODUÇÃO GERAL	16
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Caracterização da espécie.....	18
2.2 Estresse hídrico e salino	19
2.3 Atenuadores de estresses abióticos.....	22
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO 2	31
ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE <i>Cenostigma pyramidale</i> (Tul) Gagnon & G.P. Lewis EM RESPOSTA AO ESTRESSE SALINO	31
RESUMO.....	31
1. INTRODUÇÃO	32
2. MATERIAL E MÉTODOS	34
2.1 Local de condução do experimento	34
2.2 Aquisição das sementes	34
2.3 Delineamento experimental e tratamentos.....	34
2.4 Pré-tratamento das sementes.....	34
2.5 Instalação do teste de germinação sob condições de estresse salino	35
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4. CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS	50
CAPÍTULO 3	55
TRATAMENTOS PRÉ-GERMINATIVOS EM SEMENTES DE <i>Cenostigma pyramidale</i> (TUL) GAGNON & G.P. LEWIS PARA ATENUAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO.....	55
RESUMO.....	55
1. INTRODUÇÃO	56
2. MATERIAL E MÉTODOS	58
2.1 Local de condução do experimento	58
2.2 Aquisição das sementes	58
2.3 Delineamento experimental e tratamentos.....	58
2.4 Determinação da curva de imbebição	58

2.5 Pré-tratamento das sementes.....	59
2.6 Instalação do teste de germinação sob condições de déficit hídrico.....	59
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
4. CONCLUSÕES.....	72
REFERÊNCIAS	73

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL E REFERENCIAL TEÓRICO

1. INTRODUÇÃO GERAL

A região semiárida brasileira ocupa 1.335,298 Km², correspondendo a 15% do território nacional e abrangendo 1.477 municípios nos estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Minas Gerais, e Espírito Santo com população estimada de 31 milhões de habitantes (INSA, 2024). A Caatinga, único ecossistema exclusivamente brasileiro, ocupa a maior parte do semiárido, além de possuir grande diversidade de paisagens, riquezas biológicas e espécies endêmicas, enfrenta continua devastação e limitações climáticas (Drumond *et al.*, 2021), tudo isso dificulta ou impede o desenvolvimento de algumas espécies florestais, como a catingueira (*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis).

A catingueira pertence à família Fabaceae, é endêmica do Brasil com ampla distribuição geográfica, ocorrendo principalmente nas regiões Norte e Nordeste, podendo atingir até 10 m de altura e 50 cm de diâmetro (Maia, 2012; Carvalho, 2014; Ferreira *et al.*, 2022). Esta espécie possui importância ecológica e econômica, já que é utilizada para diversos fins, como madeira, medicinal, forrageira, fornecedora de néctar e pólen para as abelhas, além de indicada na recuperação de áreas degradadas (Francelino *et al.*, 2003; Salvat *et al.*, 2004; Santos; Araujo; Albuquerque, 2008; Maia-Silva *et al.*, 2012; Matias; Silva; Dantas, 2019; Leite *et al.*, 2020).

A catingueira produz abundante quantidade de sementes anualmente, cuja germinação é relativamente rápida (Maia, 2012) com certos limites de tolerância a escassez hídrica e ao estresse salino (Santos *et al.*, 2016; Matias; Silva; Dantas, 2019). No entanto, é importante verificar o comportamento dessa espécie sob condições de maior intensidade desses estresses.

A germinação inicia com a embebição das sementes, e consequentemente seguida pelos processos moleculares, bioquímicos e celulares que finalizam com a protrusão da raiz (Bewley *et al.*, 2013). Dentre os fatores abióticos, os estresses hídricos e salino estão entre os mais comprometedores dos processos germinativos das sementes das espécies agrícolas e florestais, especialmente em regiões áridas e semiáridas (Guedes *et al.*, 2013; Costa *et al.*, 2021; Matos; Oliveira, 2021). Esses estresses provocam efeitos negativos sobre a germinação (Marcos-Filho, 2015), afetando as demais etapas do crescimento das plântulas (Taiz *et al.*, 2017).

O déficit hídrico geralmente reduz a germinação, deixando sementes e plântulas com menor resistência às condições ambientais adversas, bem como ao ataque de patógenos (Kappes *et al.*, 2010). A deficiência hídrica se constitui como fator limitante para a germinação das sementes, pois provoca alterações bioquímicas e metabólicas, restringindo a hidratação dos tecidos internos, a atividade respiratória e a degradação e mobilização de reservas para o desenvolvimento do eixo embrionário (Leal *et al.*, 2020; Nóbrega *et al.*, 2021). Além disso, induz a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) ocasionando o estresse oxidativo nos tecidos das sementes (Khan *et al.*, 2019).

Quanto ao estresse salino, o excesso de sais no solo e na água ocasiona o impedimento na absorção de água pelas sementes em decorrência da diminuição do potencial osmótico do substrato devido à não assimilação do CO² (Chaves; Flexas; Pinheiro, 2009). Isso contribui na formação de EROs comprometendo a integridade celular e redução da capacidade fotossintética das plantas (Taiz *et al.*, 2017; Shan *et al.*, 2024).

Portanto, em função dos estresses abióticos, as sementes vêm sendo tratadas com atenuadores antes da semeadura visando reduzir os efeitos deletérios causados por estes estresses durante a germinação e crescimento das plântulas (Carvalho *et al.*, 2020). Neste contexto, as mais estudadas são as hortaliças e grandes culturas, sendo pouco encontrado pesquisas com atenuadores em espécies florestais. O uso desses mitigadores, tem se mostrado como alternativa eficiente, possibilitando melhor desenvolvimento das espécies vegetais (Nóbrega *et al.*, 2021).

Entre as técnicas utilizadas como atenuador de estresse, tem-se destacado o hidrocondicionamento. Este procedimento consiste na embebição controlada das sementes, em quantidade suficiente para promover a ativação das fases iniciais da germinação (fases I e II), sem que ocorra a protrusão da raiz primária (fase III) (Bewley *et al.*, 2013). Em trabalho realizado por Ramalho *et al.* (2020), foi possível verificar que o hidrocondicionamento reduziu os efeitos negativos do estresse salino sobre o vigor das sementes de *Piptadenia moniliformis*, até o limite de -0,9 MPa.

O uso de alguns fitohormônios vegetais têm sido usados para atenuar os efeitos de estresses abióticos. Entre estes, o ácido salicílico é um dos que auxilia no processo germinativo das sementes (Nóbrega *et al.*, 2021). Esse hormônio vegetal apresenta diversas funções fisiológicas nas plantas, como, indução de florescimento, absorção de nutrientes, biossíntese de etileno, fechamento de estômatos e fotossíntese (Silva *et al.*, 2020). Silva *et al.* (2014). Estes autores verificaram que o uso desse hormônio foi favorável ao processo germinativo, e mesmo com a redução do índice de velocidade de germinação, proporcionou maior porcentagem de

germinação das sementes. Realizando trabalhos em genótipos de sementes de gergelim sob diferentes potenciais osmóticos, Silva *et al.* (2017) verificaram que o ácido salicílico na concentração de 10^{-5} M foi capaz de induzir tolerância ao déficit hídrico para o genótipo CNPA-G4.

As giberelinas, essencialmente o ácido giberélico (GA_3), são responsáveis por induzir a germinação de sementes e realizar o alongamento dos entrenós (Ryu; Cho, 2015), atuando principalmente no estímulo dos processos essenciais como a expansão e divisão celular, além do alongamento da gema apical caulinar e das raízes, como também na sexualidade floral e formação de frutos (Taiz *et al.*, 2017). Nesse sentido, Pereira *et al.* (2024) verificaram que os ciclos de condicionamento com água e ácido giberélico em *Mimosa caesalpiniiifolia*, permitiram a germinação e o estabelecimento de mudas sob condições de estresse salino.

Diante da importância econômica e social da catingueira e considerando que os estresses abióticos podem afetar negativamente a germinação e crescimento das plântulas, objetivou-se avaliar o desempenho fisiológico de sementes desta espécie sob tratamentos pré-germinativos e submetidas a restrição hídrica e estresse salino.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Caracterização da espécie

Cenostigma pyramidale (Tul. Gagnon & G.P. Lewis, (sinonímia *Poincianella pyramidalis* [Tul.] L.P. Queiroz, *Caesalpinia pyramidalis* [Tul.]), é uma espécie florestal pertencente à família Fabaceae que apresenta várias denominações de acordo com a região onde se encontra. Conhecida como canela-de-velho, catingueira-verdadeira e pau-rato no Rio Grande do Norte, Alagoas, Pernambuco e Minas Gerais; catingueira, no Piauí; catingueira-de-porco na Paraíba e em Sergipe; catingueira-de-mulata, catingueira-grande, catingueira-de-folhas-largas e mussitaíba. Essas várias denominações com o nome catingueira, se dá em decorrência do odor desagradável de suas folhas (Matias; Silva; Dantas, 2019).

A espécie florestal é endêmica do ecossistema Caatinga e está entre as árvores amplamente distribuída nos levantamentos realizados neste ambiente (Santana; Souto, 2006), com ocorrência comprovada no Norte (AM), e Nordeste (AL, BA, CE, MA, PB, PI e SE) (Reflora, 2024). Adapta-se bem em diversos ambientes, desde áreas de várzeas úmidas, como no Seridó semiárido, além do litoral, sertão e pé de serra (Maia, 2012), podendo atingir até 10 metros de altura e 50 centímetros de diâmetro, no entanto em áreas semiáridas, seus arbustos

reduzem a pelo menos dois metros de altura e poucos centímetros de diâmetro (Maia, 2012; Carvalho, 2014).

A catingueira é uma árvore de porte médio, copa aberta, arredondada, irregular e ramos verdes, casca de coloração cinza-claro, quando na fase adulta apresenta cor castanho, com espessura que chega a medir até 10 mm. Suas folhas são bipinadas, com 5 a 11 folíolos alterno e sésseis. A inflorescência ocorre em panículas curtas, terminal ou axilas-terminal. As flores emitem um odor adocicado, com pétalas amarelas e uma pétala central com pontuações avermelhadas que apresentam guias de néctar (Maia-Silva *et al.*, 2012).

O fruto da catingueira é um legume (vagem) que chega a medir de 8 a 12 cm de comprimento por 2 a 2,5 cm de largura. São frutos balísticos, ou seja, dispersos por deiscência explosiva (Leite; Machado, 2009), de coloração castanho-claro e suas sementes são achatadas, ovaladas, castanhos-claro e lustrosas (Maia-Silva *et al.*, 2012; Maia, 2012; Carvalho, 2014).

As sementes de catingueira são quiescentes, ou seja, inicia e completa o processo germinativo quando as condições ambientais são adequadas. Para condução do teste de germinação, Brasil (2013) indica as temperaturas de 20; 30 ou 20-35 °C, cuja primeira contagem é com sete dias e a última com 14 dias.

A catingueira possui grande importância ambiental e econômica para o ecossistema Caatinga, uma vez que, é bastante utilizada por comunidades rurais por apresentar múltiplos usos. No contexto florestal, sua utilização se dá por sua capacidade de restaurar áreas degradadas, em virtude de notável resistência a diferentes tipos de solos e as condições ambientais distintas (Maia, 2012; Carvalho, 2014; Matias; Silva; Dantas, 2019).

A madeira é considerada de boa qualidade, sendo utilizada na produção de estacas, mourões, lenha, carvão e na alimentação animal como forragem (Santos; Araujo; Albuquerque, 2008; Santos *et al.*, 2020), além disso, apresenta outros usos associados, como na apicultura, fornecendo néctar e pólen para as abelhas (Maia-Silva *et al.*, 2012), na medicina com propriedades medicinais comprovadas, como anti-inflamatório, cicatrizante e antimicrobiana (Salvat *et al.*, 2004; Leite *et al.*, 2020) e forrageira (Matias; Silva; Dantas, 2019).

2.2 Estresse hídrico e salino

A água é um fator indispensável no processo germinativo e no desenvolvimento das plantas, pois atua em diversos processos fisiológicos. Dentre estes está o processo fitoquímico da fotossíntese, realizando o transporte e absorção de nutrientes, assim sendo um recurso

indispensável e limitante para o desenvolvimento das espécies (Campos; Santos; Nakarath, 2021).

A água é essencial para a germinação, pois participa de todas as etapas do metabolismo germinativo, tanto direta quanto indiretamente. Funciona como estimulante e controlador, amolecendo o tegumento das sementes, facilita a entrada de oxigênio, proporciona aumento no volume do embrião e dos tecidos de reserva e ativa as principais atividades celulares e metabólicas no qual favorece o crescimento do eixo embrionário (Carvalho; Nakagawa, 2012; Marcos-Filho, 2015; Gonçalves *et al.*, 2024).

O estresse por escassez de água no solo se estabelece como um dos fatores ambientais mais importantes que interferem no desenvolvimento das plantas (Uzildaya *et al.*, 2012). De acordo com Lima e Torres (2015), o déficit hídrico atua como fator limitante ao desenvolvimento das plantas, exercendo influência negativa sobre a sobrevivência, o crescimento, o acúmulo de biomassa, os processos de assimilação primária, bem como na absorção de CO₂ e de minerais. Esse tipo de estresse encarrega-se de determinar como o solo e o clima limitaram a distribuição de espécies vegetais.

As plantas são afetadas em todos os aspectos em condições de estresse hídrico. Associado a excessiva demanda evaporativa e ao limitado suprimento de água é possível observar aumento na concentração de solutos em seus tecidos, diminuição do volume celular, e de forma mais lenta, a desidratação do protoplasma (Nogueira; Albuquerque; Silva, 2005). Diante da intensificação dessa problemática, as plantas respondem através do fechamento estomático, como forma de defesa, o que compromete a respiração. Além disso, há mudanças na anatomia das plantas, murchamento das folhas, alterações fotossintéticas, e em áreas mais limitantes, pode levar a morte da planta (Moreno; Lopes, 2005; Taiz *et al.*, 2017; Ahluwalia; Singh; Bhatia, 2021).

Para simular o déficit hídrico em condições controladas, tem sido utilizado soluções de polietilenoglicol (PEG 6000) por reduzir a disponibilidade água e, conseqüentemente, afetar a sua absorção pelas sementes (Azerêdo; Paula; Valeri, 2016). Dessa forma, o processo germinativo é comprometido devido a resistência durante a ativação do metabolismo e as atividades subsequentes (Masetto *et al.*, 2014).

Trabalhos que simulam condições de déficit hídrico relacionados à germinação e vigor das sementes foram realizados para diversas espécies florestais, cujo limite de tolerância, varia entre as espécies. Em sementes de juazeiro (*Zizyphus joazeiro*) a germinação aconteceu entre os limites de -0,6 e -0,9 MPa (Lima; Torres, 2009), angico (*Anadenanthera colubrina*) até -0,6 MPa (Rego *et al.*, 2011), embira-branca (*Apeiba tibourbou*) entre -0,4 e -0,6 MPa (Guedes *et*

al., 2013), cumaru-nordestino (*Amburana cearenses*), até -0,6 MPa (Almeida *et al.*, 2014), catingueira (*C. pyramidale*) não germinou a partir de -0,8 MPa (Santos *et al.*, 2016). Estudos mais recentes revelaram que catanduva (*Pityrocarpa moniliformis*) foi afetada negativamente a partir de -0,1 MPa (Matos & Oliveira, 2021), ipê-branco (*Tabebuia roseoalba*) e ipê-amarelo (*Handroanthus chrysotrichus*), os efeitos limitantes ocorreram entre -0,8 e -1,0 MPa, já o ipê-roxo (*H. impetiginosus*) se mostrou mais sensível com limite de tolerância entre -0,6 e -0,8 MPa (Valdovinos *et al.*, 2021).

Mesmo havendo espécies florestais pertencentes ao ecossistema Caatinga que possuem tolerância ao déficit hídrico, torna-se indispensável informações que busquem analisar o desempenho desse grupo de plantas em condições de indisponibilidade hídrica. Dessa forma, ter maior entendimento dos efeitos de seca mais severas na adaptação e produção de espécies florestais, e com isso, buscar por soluções que possam mitigar tais problemas (Nóbrega *et al.*, 2021).

A salinidade é um dos fatores abióticos significativos que influenciam na produtividade agrícola e ecológica a nível global. Níveis elevados de sais no solo e da água de irrigação afeta o crescimento e desenvolvimento das plantas pelo acúmulo de íons nas células vegetais e desencadeia estresse osmótico, toxicidade iônica e estresse oxidativo (Zhang *et al.*, 2023). Segundo Nobre *et al.* (2010), o excesso de íons sódio (Na^+) e cloro (Cl^-) no solo podem interferir significativamente nos processos metabólicos das plantas. Quando no meio do crescimento radicular, causa toxidez. Quando acumulado nos tecidos vegetais ocasionam mudanças na capacidade da planta em absorver, transportar e utilizar os íons necessários ao seu crescimento.

Concentrações de sais elevadas no substrato promove o estresse osmótico e afeta a absorção de água pelas sementes. Mas, quando absorvidos e acumulados no citosol das células vegetais, os íons causam desorganização do status nutricional das plântulas pelo desbalanço iônico, afetando a translocação de nutrientes do tecido de reserva para as regiões meristemáticas (Costa *et al.*, 2021).

Para as sementes germinarem, é necessário a quebra de uma quantidade considerável de amido, visando fornecer energia para que ocorra a síntese do material. O estresse salino inibe a atividade da α -amilase e diminui o teor de açúcar solúvel nas sementes (Li *et al.*, 2023).

Concentrações de Na^+ e Cl^- no interior dessas células acima de 100 mM causam a desnaturação de proteínas e a desorganização da membrana, por causa da redução da hidratação dessas macromoléculas (Taiz *et al.*, 2017). O excesso desses sais, restringe a absorção de água em virtude da diminuição do potencial osmótico do substrato, prorrogando a embebição da semente ou alongamento das raízes, o que consequentemente afeta a germinação (Esteves;

Suzuki, 2008; Góis; Torres; Pereira ,2008; Chaves *et al.*, 2009; Tarchoun *et al.*, 2022). Além de ocorrer o atraso da emergência das plântulas, mobilização de reservas e consequentemente diminuição da viabilidade das sementes por prejudicar os processos fisiológicos e metabólicos dos tecidos embrionários (Munns; Tester, 2008; Voigt *et al.*, 2009).

O estresse salino está associado com a peroxidação lipídica nas membranas celulares, causando danos ao DNA, desnaturação de proteínas, oxidação de carboidratos, quebra de pigmentos o que consequentemente gera o comprometimento da atividade enzimática, assim como adaptações metabólicas, que envolvem principalmente o acúmulo de metabolitos (Saibi *et al.*, 2015).

O estresse salino afeta significativamente o desenvolvimento de plântulas, comprometendo germinação de sementes, crescimento e vigor. Em sementes de paineira (*Ceiba speciosa*) e pau-de-balsa (*Ochroma pyramidale*), Carvalho *et al.* (2020) observaram quedas na primeira contagem, germinação, índice de velocidade de germinação e comprimento radicular com o aumento da salinidade por NaCl. Santos *et al.* (2021), constataram efeitos similares em *C. pyramidale*, com redução na emergência e IVG sob estresse salino. Já Medeiros *et al.* (2023), demonstraram que em craibeira (*Tabebuia aurea*), o CaCl_2 foi mais prejudicial a partir de 6 dSm^{-1} , seguida por NaCl e KCl.

2.3 Atenuadores de estresses abióticos

Dentre as estratégias que vem sendo empregada para promover maior tolerância a condições de estresses abióticos, o uso de atenuadores tem se mostrado como alternativa promissora possibilitando melhor desenvolvimento das espécies vegetais (Nóbrega *et al.*, 2021). Nos estudos, é possível verificar que grupos hormonais (ácido abscísico, auxinas, citocininas, etileno e giberelina) exibem potenciais respostas e sinalização na atenuação de danos abióticos (Qin; Shinozaki; Yamaguchi- Shinozaki, 2011).

Os fitohormônios são substâncias orgânicas que surgem naturalmente e são sintetizadas pelas próprias plantas. Em baixas concentrações podem desempenhar diversas ações, desde estimular, inibir ou até alterar os processos morfológicos e fisiológicos do vegetal (Kerbaui, 2008). Por outro lado, os reguladores vegetais sintéticos são substâncias produzidas em laboratório (Santos; Kobner; Carvalho, 2024), que de acordo Taiz *et al.* (2017), possuem as mesmas propriedades dos naturais quando utilizados em quantidades menores tendo em vista o mesmo objetivo em proporcionar características quantitativas e qualitativas.

Recentemente, tem-se buscado por outros compostos que podem afetar o crescimento e o desenvolvimento vegetal. Dentre esses, destaca-se os ácidos salicílico, giberélico, além de técnicas como o hidrocondicionamento (Ramalho *et al.*, 2020; Nobrega *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2021).

O hidrocondicionamento é uma técnica alternativa utilizada para diminuir os efeitos negativos aos estresses abióticos. Consiste na embebição controlada das sementes, geralmente em substrato de papel umedecido com água, em quantidade suficiente para promover a ativação das fases iniciais da germinação (fases I e II), sem que ocorra a protusão da raiz primária (fase III) (Bewley *et al.*, 2013). Constitui-se em uma tecnologia útil, principalmente em áreas que apresentam condições ambientais adversas, principalmente com altas temperaturas e com escassez hídrica (Oliveira *et al.*, 2021).

Os resultados obtidos com o hidrocondicionamento são o aumento da taxa de velocidade e uniformidade no processo germinativo, além de favorecer o alcance de estandes adequados em campo (Kayo, 2020). Em trabalho realizado por Ramalho *et al.* (2020), verificou-se que o hidrocondicionamento reduziu os efeitos negativos do estresse salino sobre o vigor das sementes de *Piptadenia moniliformis*, até o limite de -0,9 MPa.

O ácido salicílico é um fitohormônio que auxilia no processo germinativo das sementes, contribuindo como agente atenuante aos efeitos dos estresses abióticos (Nóbrega *et al.*, 2021). A embebição das sementes por esse ácido proporciona maior tolerância durante a germinação e estabelecimento inicial da planta, além de contribuir como um promotor a sinalização e expressão de genes envolvidos na homeostase induzido pelo estresse (Nóbrega *et al.*, 2020). Esse hormônio vegetal apresenta diversas funções fisiológicas nas plantas, como indução de flores, absorção de nutrientes, biossíntese de etileno fechamento de estômatos e fotossíntese (Silva *et al.*, 2020).

Em testes avaliando o ácido salicílico como agente atenuador do estresse hídrico na germinação e crescimento inicial de plântulas de mandacaru (*Cereus jamacaru*), Nóbrega *et al.* (2021) verificaram que a embebição de sementes com esse ácido atenuou o efeito do déficit hídrico, indicando ser a dose de 1,71 mM L⁻¹ a mais eficaz. Figueiredo *et al.* (2019) utilizando o ácido salicílico em plantas de mulungu verificaram que ao aplicar esse ácido houve aumento linear na concentração intercelular (Ci) das plantas quando comparadas ao tratamento controle. Já Silva *et al.* (2020) constataram que esse aumento ocorreu em decorrência da regulação estomática por meio da atuação desse ácido, possibilitando a entrada e saída de CO₂ nas células e, favorecendo a taxa de fotossíntese.

As giberelinas, essencialmente o ácido giberélico (AG₃) são responsáveis por induzir a germinação de sementes e realizar o alongamento dos entrenós, atuando principalmente no estímulo dos processos essenciais como a expansão e divisão celular, além do alongamento da gema apical caulinar e das raízes, como também na sexualidade floral e formação de frutos (Ryu; Cho, 2015). Na maioria das espécies, esse hormônio atua no alongamento das células, possibilitando as raízes primárias o rompimento dos tecidos que interferem no seu desenvolvimento, como fontes de reserva (endosperma), o tegumento ou estruturas do fruto (Taiz *et al.*, 2017).

Em estudo sob condições de estresses, o ácido giberélico tem apresentado resultados promissores, conforme relatos de Costa *et al.* (2021), ao verificarem a ação de diferentes agentes atenuadores do déficit hídrico na germinação e acúmulo de compostos orgânicos em plântulas de *Salvia hispanica*, tendo o ácido giberélico se mostrado eficiente na mitigação do estresse hídrico nas sementes até o potencial -0,4 MPa. Já o trabalho realizado por Pereira *et al.* (2024), utilizando ciclos de priming com mitigadores de tolerância à salinidade em espécies de sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*) e catanduva (*Pityrocarpa moniliformis*), foi possível verificar que os ciclos de condicionamento com água e ácido giberélico contribuiu para a germinação e uniformidade destas espécies.

A utilização de atenuadores em sementes sob condições de estresses abióticos é benéfico, no entanto sua resposta depende da espécie avaliada, dosagens e tempos de pré-tratamento. Além disso, estudos voltados para as espécies florestais ainda são escassos, principalmente aquelas pertencentes ao ecossistema Caatinga. Dessa forma, se faz necessário investigar a resposta aos atenuadores para *C. pyramidale* quando submetidas aos estresses hídricos e salinos.

REFERÊNCIAS

- AHLUWALIA, O.; SINGH, P. C.; BHATIA, R. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 5, p. 100032, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>
- ALMEIDA, J. P. N. et al. Estresse hídrico e massa de sementes na germinação e crescimento de plântulas de *Amburana cearensis* (Allemão) AC Smith. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n.4 p. 777-787, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902014000400016>
- BEWLEY, J. D. et al. **Seeds: physiology of development, germination and dormancy**. 3. ed. New York: Springer., 2013, 392 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instruções para análise de sementes florestais**. Brasília: MAPA, 2013, 97 p.
- CAMPOS, A. J. M; SANTOS, S. M.; NACARATH, I. R. F. F. Estresse hídrico em plantas: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 15, p. e311101523155-e311101523155, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i15.23155>
- CARVALHO, J. S. B. et al. Estresse salino por NaCl em sementes de paineira e pau de balsa. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 42134-42146, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-667>
- CARVALHO, N. M; NAKAGAWA, J. **Sementes: ciência, tecnologia e produção**. 5 ed. Jaboticabal: Fune.2012. 590 p.
- CARVALHO, P. E. R. Embrapa Informação Tecnológica. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília. v.5, n. 1, p.225-231, 2014.
- CHAVES, M. M.; FLEXAS, J.; PINHEIRO, C. Photosynthesis under drought and salt stress: regulation mechanisms from whole plant to cell. **Annals of Botany**, v. 103, n. 4, p. 551-560, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcn125>
- COSTA, A. A. et al. Osmoproteção em sementes de *Salvia hispanica* L. sob atenuadores do estresse hídrico. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e233547, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.233547>
- DRUMOND, M. A. et al. **Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) como alternativa para diversificação de renda no semiárido brasileiro**. Cap. 30, p. 1057-1064, 2021. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1131712/1/Livro-Eucalipto.Sistema-de-integracaoILPF.cap30.2021.pdf>. Acesso em: [13 de maio de 2025]
- ESTEVES, B. S; SUZUKI, M. S. Efeito da salinidade sobre as plantas. **Oecologia Brasiliensis**, v. 12, n. 4, p. 6, 2008. Disponível em: [file:///C:/Users/pablo/Downloads/Dialnet-EfeitoDaSalinidadeSobreAsPlantas-2883337%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/pablo/Downloads/Dialnet-EfeitoDaSalinidadeSobreAsPlantas-2883337%20(2).pdf). Acesso em [13 de maio de 2025]

FERREIRA, T. C. et al. Promoção em vigor e germinação em sementes da caatinga pela utilização de técnicas de priming. **BIOFIX Scientific Journal** v. 7, n. 1, p. 37-45, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5380/biofix.v7i1.81424>

FIGUEIREDO, F. R. A. et al. Respostas fisiológicas de mulungu submetida a estresse salino e aplicação de ácido salicílico. **Irriga**, v. 24, n. 3, p. 662-675, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p662-675>

FRANCELINO, M. R. et al. Contribuição da caatinga na sustentabilidade de projetos de assentamentos no sertão norte-rio-grandense. **Revista Árvore**, v. 27, n. 1, p. 79-86, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000100011>

GÓIS, V. A.; TORRES, S. B.; PEREIRA, R. A. Germinação de sementes de maxixe submetidas a estresse salino. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 4, 2008. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/798/412>. Acesso em [13 de maio de 2025]

GONÇALVES, J. P. et al. Metabolic control of seed germination in legumes. **Journal of Plant Physiology**, v. 295, p. 154206, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2024.154206>

GUEDES, R. S. et al. Germinação e vigor de sementes de Apeiba tibourbou submetidas ao estresse hídrico e diferentes temperaturas. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 45-53, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050988438>

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (Brasil). **Delimitação do semiárido brasileiro 2024**. [S. l.]: INSA, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/insa/pt-br/centrais-de-conteudo/mapas/mapas-em-pdf/delimitacao-do-semiarido-brasileiro-2024.pdf/view>. Acesso em: [04 junho 2025]

KAPPES, C. et al. Germinação, vigor de sementes e crescimento de plântulas de milho sob condições de déficit hídrico. **Scientia Agraria**, v. 11, n. 2, p. 125-134, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=99515218005>. Acesso em [13 de maio de 2025]

KAYA, N. Effect of priming treatments and active carbon on seed germination of two calendula species. **American Journal of Innovative Research and Applied Sciences**, v. 11, n. 6, p. 182-186, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Nergis-Kaya-3/publication/348154124_EFFECT_OF_PRIMING_TREATMENTS_AND_ACTIVE_CARBON_ON_SEED_GERMINATION_OF_TWO_CALENDULA_SPECIES/links/5ff0b08c45851553a014e9c4/EFFECT-OF-PRIMING-TREATMENTS-AND-ACTIVE-CARBON-ON-SEED-GERMINATION-OF-TWO-CALENDULA-SPECIES.pdf. Acesso em [13 de maio de 2025]

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2ª ed., Ed. Guanabara, Rio de Janeiro, 2008, 431 p.

KHAN, M. N. et al. Seed priming with melatonin coping drought stress in rapeseed by regulating reactive oxygen species detoxification: Antioxidant defense system, osmotic adjustment, stomatal traits and chloroplast ultrastructure perseveration. **Industrial Crops and Products**, v. 140, p. 111597, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111597>

LEAL, C. C. P. et al. Estresse hídrico na germinação e vigor de sementes de mofumbo (*Combretum leprosum* Mart.) em diferentes temperaturas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, p. e20186357, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200013>

LEITE, A. V; MACHADO, I. C. Biologia reprodutiva da "catingueira" (*Caesalpinia pyramidalis* Tul., Leguminosae-Caesalpinioideae), uma espécie endêmica da Caatinga. **Brazilian Journal of Botany**, v. 32, n. 1, p. 79-88, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-84042009000100008>

LEITE, M. S. et al. Morphological and biochemical responses of *Poincianella pyramidalis* seedlings subjected to water restriction. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n.4, p. e20180148, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.014818>

LI, H. et al. Exogenous ethylene promotes the germination of cotton seeds under salt stress. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 42, n. 6, p. 3923-3933, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10859-z>

LIMA, B. G.; TORRES, S. B. Estresses hídrico e salino na germinação de sementes de *Zizyphus joazeiro* Mart. (Rhamnaceae). **Revista Caatinga**, v. 22, n. 4, p. 93-99, 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufersa.edu.br/caatinga/article/view/1455/pdf>. Acesso em: [04 de junho de 2025]

MAIA-SILVA, C. et al. **Guia de plantas: visitadas por abelhas na caatinga**. Fortaleza: Fundação Brasil Cidadão, p.191, 2012.

MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2 ed. Londrina, PR: ABRATES, 2015.659 p.

MARENCO, R. A., LOPES, N. F. . **Fisiologia vegetal**: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral. Viçosa MG: UFV, p. 451, 2005.

MASETTO, T. E. et al. Germinação de sementes de *Dimorphandra mollis* Benth.: efeito de salinidade e condicionamento osmótico. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 12, n. 3, 2014. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/rbrasbioci/article/view/114832/62110>. Acesso em [04 de junho de 2025]

MATIAS, J. R.; SILVA, F. F. S.; DANTAS, B. F. Catingueira-verdadeira *Poincianella pyramidalis* [Tul.] LP Queiroz. Informativo **ABRATES**, v. 29, n. 1/3, p. 28-33, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1089204/1/NotaTecnica06.pdf>. Acesso em: [04 de junho de 2025]

MATOS, D. C. P.; OLIVEIRA, D. Y. B. Germinação e vigor de sementes de *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & RW Jobson sob condições de estresse salino e hídrico. Águas e florestas: desafios para conservação e utilização. Guarujá: **Científica Digital**, v. 1, p. 277-291, 2021. DOI: 10.37885/210404395

MEDEIROS, H. L. S. et al. Desempenho fisiológico de sementes de *Tabebuia aurea* submetidas a estresses abióticos. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 4, p. 962-970, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n423rc>

NÓBREGA, J. S. et al. Ácido salicílico atenua o efeito do estresse hídrico na germinação e crescimento inicial de plântulas de *Cereus jamacaru* DC. **Scientia Plena**, v. 17, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.040204>

NÓBREGA, J. S. et al. Acúmulo de biomassa e pigmentos fotossintéticos em plantas de *Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze sob estresse salino e doses de ácido salicílico. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 5, p. e121953286-e121953286, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i5.3286>

OLIVEIRA, V. N. S. et al. tolerance and pre-germinative treatments in jucá seeds (*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz var. *ferrea*) submitted to salinity. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 8, p. 49692-49698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.22671.08.2021>

PEREIRA, K. T. O. et al. Priming cycles with salinity tolerance elicitors in seeds of *Mimosa caesalpiniiifolia* and *Pityrocarpa moniliformis*. **Biologia**, v. 79, n. 2, p. 411-424, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11756-023-01596-z>

QIN, F.; SHINOZAKI, K.; YAMAGUCHI-SHINOZAKI, K. Achievements and challenges in understanding plant abiotic stress responses and tolerance. **Plant and Cell Physiology**, v. 52, n. 9, p. 1569-1582, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1093/pcp/pcr106>

RAMALHO, L. B. et al. Hidrocondicionamento de sementes de *Piptadenia moniliformis* Benth. e seus efeitos sobre a tolerância ao estresse salino. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 221-230, 2020. DOI: [10.5902/1980509829998](https://doi.org/10.5902/1980509829998)

REFLORA. **Herbário Virtual**. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual/ConsultaPublicoHVUC/ConsultaPublicoHVUC.do?idTestemunho=5914275> Acesso em: [25 de maio de 2024]

REGO, S. S. et al. Estresse hídrico e salino na germinação de sementes de *Anadenanthera colubrina* (Velloso) Brenan. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 2, n. 4, p. 37-42, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Andre-Luis-Lopes-Da-Silva/publication/234840557_Water_and_Salt_Stress_in_the_Germination_of_Anadenanthera_colubrina_Velloso_Brenan_Seeds/links/09e415101c015a0586000000/Water-and-SaltStress-in-the-Germination-of-Anadenanthera-colubrina-Velloso-Brenan-Seeds.pdf. Acesso em [04 de junho de 2025]

RYU, H.; CHO, Yong-Gu. Plant hormones in salt stress tolerance. **Journal of Plant Biology**, v. 58, p. 147-155, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12374-015-0103-z>

SALVAT, A. et al. Antimicrobial activity in methanolic extracts of several plant species from northern Argentina. **Phytomedicine**, v. 11, n. 2-3, p. 230-234, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1078/0944-7113-00327>

SANTOS, C. A. et al. Germinação de duas espécies da caatinga sob déficit hídrico e salinidade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 219-224, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.87.1017>

SANTOS, J. P.; ARAÚJO, E. L.; ALBUQUERQUE, U. P. Richness and distribution of useful woody plants in the semi-arid region of northeastern Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 5, p. 652-663, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.08.004>

SANTOS, T. M. M; KOBNER, D. R. S; CARVALHO, T.C. reguladores vegetais: influência da giberelina na indução de floração e formação de frutos do morangueiro (Agronomia). **Repositório Institucional**, v. 2, n. 2, 2024. Disponível em: <https://revistas.icesp.br/index.php/Real/article/view/5176>. Acesso em: [04 de junho de 2025]

SANTOS, W. R. et al. Emergência e a forma inicial de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Fabaceae) sob estresse salino. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. e18910514870-e18910514870, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i5.14870>

SANTOS, W. S. et al. Firewood and forage production from *Poincianella pyramidalis* (Tul.) LP Queiroz subjected to anual pruning. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 89-103, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832500>

SHAN, L. et al. Effects of salicylic acid on growth, physiology, and gene expression in rice seedlings under salt and drought stress. **Plant Stress**, v. 11, p. 100413, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100413>

SILVA, A. A. R. et al. Ácido salicílico como atenuador do estresse salino de gravioleira. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 1092-1101, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n424rc>

SILVA, A.C. et al. Salicylic acid as attenuator of drought stress on germination and initial development of sesame. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol. 21, n. 3, p. 156-162, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi>

SILVA, T. C. F. S. et al. Germinação de sementes de melancia sob diferentes métodos de tratamento com reguladores vegetais. **Scientia Plena**, v. 10, n. 3, 2014. Disponível em: <https://www.scientiaplenua.org.br/sp/article/view/1794/944>. Acesso em:[04 de junho de 2025]

SOUSA, A. C. M. et al. Aplicação de doses de ácido giberélico (ga3) como tratamento pré-germinativo em sementes de *Hymenaea Courbaril*. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 93-99, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0009>

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=PpO4DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=TAIZ,+L.+%3B+ZEIGER,+E.+%3B+M%C3%98LLER,+I.+M.+%3B+MURPHY,+A.+Fisiologia+e+desenvolvimento+vegetal.+6ed.+Porto+Alegre:+Artmed,+2017.+888+p.+&ots=7SEp qXFRTe&sig=FKhsYbdAYcYwZqzqsnQmJT_X4Vk#v=onepage&q&f=false. Acesso em: [04 de junho de 2025].

TARCHOUN, N. et al. The effects of salt stress on germination, seedling growth and biochemical responses of tunisian squash (*Cucurbita maxima* Duchesne) germplasm. **Plants**, v. 11, n. 6, p. 800, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11060800>

UZILDAY, B. et al. Comparison of ROS formation and antioxidant enzymes in *Cleome gynandra* (C4) and *Cleome spinosa* (C3) under drought stress. **Plant Science**, v. 182, p. 59-70, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.03.015>

VALDOVINOS, T. M. et al. Germinação de sementes de três espécies arbóreas da família Bignoniaceae sob estresse hídrico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, p. e20207560, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20210072>

ZHANG, Y. et al. Plants' response to abiotic stress: mechanisms and strategies. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 13, p. 10915, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241310915>

CAPÍTULO 2

ALTERAÇÕES FISIOLÓGICAS E BIOQUÍMICAS DE PLÂNTULAS DE *Cenostigma pyramidale* (Tul) Gagnon & G.P. Lewis EM RESPOSTA AO ESTRESSE SALINO

RESUMO

As espécies florestais são fundamentais para a manutenção e o equilíbrio dos ecossistemas, oferecendo serviços ambientais essenciais, como conservação da biodiversidade, e contribuindo para a reconstituição e conservação de áreas degradadas, o que representa um valor econômico e social considerável. Contudo, a produtividade e o estabelecimento das diferentes espécies são afetados por fatores ambientais adversos. Nesse contexto, a salinidade é um dos principais estresses abióticos que prejudica o crescimento e o metabolismo das plantas. Diante disso, objetivou-se avaliar as alterações fisiológicas e bioquímicas de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul) Gagnon & G.P. Lewis em resposta ao estresse salino. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 6, sendo o primeiro fator referente a três tipos de sais (NaCl, CaCl₂ e KCl) e o segundo, os níveis de salinidade (0,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0; e 25,0 dSm⁻¹), com quatro repetições de 25 sementes cada. As variáveis morfofisiológicas analisadas foram a germinação, primeira contagem, índice de velocidade de germinação, comprimento da parte aérea e da raiz, massa seca da parte aérea e raiz das plântulas. As análises bioquímicas foram os açúcares solúveis totais, aminoácidos livres totais e prolina livre. Dos agentes osmóticos testados, o NaCl foi o que mais causou danos ao desenvolvimento das plântulas, com alterações significativas a partir de 5 dSm⁻¹ seguido pelo CaCl₂ e KCl. Bioquimicamente, os teores de açúcares solúveis e aminoácidos livres elevaram-se significativamente em resposta ao NaCl, enquanto a prolina apresentou acúmulo crescente sob estresse por KCl.

Palavras-chave: Fabaceae; catingueira; estresse abiótico; salinidade, osmólitos.

1. INTRODUÇÃO

Cenostigma pyramidale (Tul.) Gagnon G.P. Lewis, conhecida popularmente como catingueira, é uma espécie florestal pertencente à família Fabaceae, endêmica do Brasil e amplamente disseminada no ecossistema Caatinga. Caracterizada como pioneira, essa espécie desempenha papel importante na sucessão ecológica e apresenta diversas finalidades de uso. É empregada principalmente como forrageira e madeireira sendo esta última amplamente explorada para a obtenção de lenha, carvão, estacas e mourões. Além desses usos, a catingueira também é valorizada na medicina popular (Ferreira *et al.*, 2022). No entanto, essas práticas resultam na remoção da árvore, o que pode colocá-la em risco de extinção (Maia, 2012; Matias *et al.*, 2018).

Diante disso, os programas de restauração florestal requerem produção substancial de mudas, o que destaca a importância de compreender os fatores que limitam o crescimento da espécie, tais como a salinidade (Nogueira *et al.*, 2020).

O aumento de áreas com solos afetados pela salinização tem se tornado um problema crescente no país, impulsionado principalmente pelo manejo inadequado da irrigação, a qualidade da água utilizada e por condições climáticas adversas, com altas taxas de evapotranspiração e temperaturas elevadas, que de acordo com a FAO (2021) afeta aproximadamente 20% das áreas irrigadas mundialmente (Sá *et al.*, 2016; Brito *et al.*, 2018). Na região semiárida, a irregularidade das chuvas e as altas taxas de evapotranspiração são fatores que contribuem para a concentração excessiva de sais nas águas superficiais e subterrâneas comprometendo significativamente a qualidade dos recursos hídricos (Silva *et al.*, 2024).

A salinidade presente no solo ou na água provoca alterações no potencial osmótico dificultando a absorção de água pelas raízes e comprometendo a assimilação de CO₂. Como consequência, ocorrem respostas fisiológicas e bioquímicas adversas, como geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), danos a integridade celular e redução eficiência fotossintética das plantas (Taiz *et al.*, 2017; Shan *et al.*, 2024; Guo *et al.*, 2024).

O estresse salino afeta o crescimento vegetal com maior severidade durante a germinação das sementes e no desenvolvimento inicial das plântulas (Santos *et al.*, 2020). Além disso, a salinidade pode causar danos, como degradação das clorofilas e mudanças no metabolismo de proteínas e nos teores de aminoácidos, por conta do estresse iônico causado da alteração na concentração de íons Na⁺ e Cl⁻ no protoplasma (Santos *et al.*, 2016).

Estudos sobre estresse em sementes têm ganhado destaque na ecofisiologia, visando avaliar os limites de tolerância e capacidade de adaptação das espécies para compreender o fato de algumas espécies conseguirem germinar e se desenvolver em condições de estresses ambientais, o que atribui vantagens ecológicas em comparação a outras espécies que apresentam maior sensibilidade (Lavezo *et al.*, 2015).

Como forma de sobressair aos danos causados pelo estresse salino, as plantas desenvolveram estratégias ao longo do processo evolutivo, incluindo osmorregulação, eliminação de espécies reativas de oxigênio (ROSs), respostas fotossintéticas, regulação de fitohormônios, e captação, exclusão e compartimentação de íons (Lee *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2024). Para ocorrer essa adaptação a salinidade, um mecanismo utilizado pelas plantas é o de realizar a osmorregulação por osmólitos orgânicos como, aminoácidos solúveis (prolina, glicina betaina, glutamina e serina) e diversos açúcares (sacarose, hexoses e álcoois de açúcar). Todos atuam como importantes osmólitos compatíveis que desempenham papel essencial para mitigar os impactos negativos do estresse salino nas plantas (Shukla *et al.*, 2021).

Estudos recentes demonstram que diferentes concentrações de sais na água podem provocar efeitos negativos, reduzindo a germinação, e vigor das sementes de espécies florestais. Ao realizar estudos com sementes de craibeira (*Tabebuia aurea*), Medeiros *et al.* (2023) verificaram que em concentrações salinas mais elevadas, ocorreu redução na germinação e vigor das mesmas e dentre os sais empregados o que mais prejudicou a espécie foi o CaCl_2 , seguido por NaCl e KCl . Já Carvalho *et al.* (2020), verificaram que nas espécies florestais de paineira (*Ceiba epeciosa*) e pau-de-balsa (*Ochroma pyramidale*), houve redução na germinação e vigor promovidos pelo estresse salino a partir da concentração de 25 mM de NaCl .

Diante do exposto, compreender como a salinidade afeta os estágios iniciais da germinação e o crescimento das plântulas permitirá identificar os limites de tolerância da catingueira. Além de desenvolver estratégias mais eficazes para a recuperação de áreas degradadas, revegetação em solos salinos e a conservação dessa espécie nativa, que desempenha papel fundamental na ecologia e na economia local da Caatinga, especialmente diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela expansão da desertificação. Por esta razão, objetivou-se avaliar as alterações fisiológicas e bioquímicas de plântulas de *C. pyramidale* em resposta ao estresse salino.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de condução do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Análise de Sementes (LAS), pertencente ao Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais (DCAF), da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró, RN (5°11' S e 37° 20' W, e 18 m altitude), no período de agosto de 2024 a janeiro de 2025.

2.2 Aquisição das sementes

As sementes de catingueira foram colhidas manualmente de frutos maduros de árvores situadas no Parque Nacional da Fuma Feia, inserido entre os municípios de Mossoró/RN e Baraúna/RN, (5°4'14,88" S e 37°32'1,51" O), em julho de 2023. Após a coleta, os frutos foram encaminhados ao Laboratório de Análises de Sementes, debulhados e realizado o beneficiamento manual com a retirada do material inerte e sementes com má formação. Após o beneficiamento, as sementes foram acondicionadas em embalagens de plástico PET (Politereftalato de Etileno) e armazenadas em ambiente controlado (16 ± 2 °C; 40 % UR).

Antes da instalação do experimento foi determinado o teor de água das sementes por meio do método da estufa a 105 ± 3 °C durante 24 horas (Brasil, 2009).

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 3 x 6, sendo o primeiro fator referente a três tipos de sais (NaCl, CaCl₂, KCl) e o segundo, os níveis de salinidade (0,0; 5,0; 10,0; 15,0; 20,0 e 25,0 dSm⁻¹) com quatro repetições de 25 sementes para cada tratamento.

2.4 Pré-tratamento das sementes

Antes de realizar o teste de germinação as sementes foram tratadas com fungicida Manfil® na dose de 1,5g/kg de sementes para evitar contaminações com fungos.

2.5 Instalação do teste de germinação sob condições de estresse salino

Como substrato para a semeadura foi utilizado papel toalha, previamente umedecidos com as soluções salinas com quantidade igual a 2,5 vezes o peso seco do papel. Em seguida, os rolos foram formados e acondicionados em sacos plásticos transparente para a manutenção da umidade. Estes foram colocados em germinadores *Biochemical Oxygen Demand* (B.O.D) à temperatura de 25 ± 2 °C com fotoperíodo de 10 horas, durante 14 dias (Brasil, 2013).

A simulação do estresse salino foi por meio das soluções cloreto de sódio (NaCl), cloreto de cálcio (CaCl₂) e cloreto de potássio (KCl) nos níveis: 0,0 (água destilada), 5,0; 10,0; 15,0; 20 e 25 dSm⁻¹ determinadas com o auxílio de condutivímetro digital TEC-4MP. Esses níveis foram determinados por meio de testes preliminares.

As variáveis consideradas para análises fisiológicas foram:

a) Germinação: foi expresso o potencial de plântulas normais aos 11 dias, levando em consideração o desenvolvimento da raiz principal e do hipocótilo visível, seguindo as recomendações de Brasil (2009), com os resultados expressos em porcentagem. O teste para a espécie florestal *C. pyramidale* tem duração de 14 dias (Brasil, 2013). No entanto, foram considerados 11 dias para esse teste em virtude da incidência de fungos durante a execução.

b) Primeira contagem: realizada no sétimo dia após a semeadura, sendo contabilizadas plântulas com o eixo hipocótilo-radicular desenvolvido.

c) Índice de velocidade de germinação (IVG): realizado simultaneamente ao teste de germinação, com contagens diárias a partir do dia seguinte à semeadura até o final do teste aos 11 dias. O índice foi determinado conforme a recomendação de Maguire (1962), em que o cálculo foi feito por meio do somatório das razões entre o número de plântulas germinadas em cada dia do teste e o número de dias decorridos desde a semeadura até a germinação.

$$IVG = \frac{G1}{N1} + \frac{G2}{N2} + \dots + \frac{Gn}{Nn} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

IVG = Índice de velocidade de germinação;

G1, G2, Gn = número de plântulas na primeira, na segunda e na última contagem, e

N1, N2, Nn = número de dias de semeadura à primeira, segunda e última contagem.

d) Comprimento da parte aérea e raiz primária: a mensuração foi realizada em 10 plântulas normais com o auxílio de uma régua graduada em centímetros (cm). Na parte aérea, a medição foi feita da base do colo ao ápice da plântula. Já o comprimento da raiz primária foi medido da base do colo a extremidade da raiz primária das plântulas. Os resultados foram expressos em centímetro por plântulas (cm/plântulas).

e) Massa seca da parte aérea e da raiz: após a medição da parte aérea e da raiz, realizou-se a separação de ambas as partes com o auxílio de uma tesoura, em seguida, as partes foram acondicionadas separadamente e identificadas de acordo com os tratamentos em sacos de papel Kraft. Os materiais foram secados em estufa de circulação de ar a 65°C durante 72 horas, até atingirem peso constante. Após a secagem, foi realizada a pesagem do material em balança analítica (0,001g). Os resultados foram expressos em miligramas por plântulas (mg/plântulas).

Realizada as análises biométricas, coletou-se amostras a partir da massa fresca das partes aérea e da raiz das plântulas após 11 dias de exposição ao estresse. Com esse material apropriadamente congelado e armazenado, foi inicialmente obtido o extrato bruto, que consistiu na pesagem de 0,2 g massa fresca das plântulas postas em tubos hermeticamente fechados e acrescidos de 3 mL de álcool 80% no qual foi realizada a maceração desse material de forma automática. Feita a maceração, os tubos passaram para o banho-maria a temperatura de 60 °C por 20 minutos. Em seguida a foram centrifugados a 10.000 rpm por 10 minutos a 4 °C de temperatura, momento em que foi coletado o sobrenadante para a determinação das variáveis seguintes:

f) Açúcares solúveis totais (AST): determinado pelo método da antrona, seguindo metodologia proposta por Yemm e Willis (1954), por meio da curva padrão de glicose, com resultados expressos em mg de glicose/g⁻¹ de massa fresca.

g) Aminoácidos totais (AT): a determinação ocorreu pelo método da ninhidina ácida (Yemm; Cocking, 1955), por meio da curva padrão de glicina, com resultados expressos em mg de glicina/g⁻¹ de massa fresca.

h) Prolina livre (PL): determinada de acordo com a metodologia proposta por Bates *et al.* (1973), para a quantificação do teor de prolina livre, sendo os resultados expresso em µmol prolina/g⁻¹ de massa fresca.

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância através do teste F, a 5% de probabilidade. Quando significativos, as variáveis quantitativas à análise de regressão, enquanto as qualitativas foram compradas pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Os dados foram submetidos à análise estatística por meio do *software* Sisvar (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As sementes de catingueira utilizadas nesta pesquisa tiveram teor de água de 11,7%, quando armazenadas em embalagens de plástico e mantidas em ambiente controlado, com temperatura de 16 ± 2 °C e umidade relativa do ar de 40 %.

De acordo com a análise de variância houve interação significativa a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) entre os sais e os níveis de estresse para todas as variáveis (Tabela 1).

Tabela 1: Resumo da análise de variância para germinação (G), primeira contagem (PC), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR) em plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob estresse salino. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de variação	de GL	Quadrado médio						
		G	PC	IVG	CPA	CR	MSPA	MSR
		(%)			(cm/plântulas)		(mg/plântulas)	
Sais	2	397,56**	1536,89**	17,90**	5,89**	4,47**	0,012**	2,15 ^{ns}
Níveis	5	367,29**	2851,02**	54,35**	24,15**	45,96**	0,044**	0,005**
Sais x Níveis	10	207,16**	400,09**	2,81**	1,74**	4,34**	0,004**	0,0005**
Erro	54							
CV		10,01	13,33	11,43	11,48	14,46	16,36	14,39
Médias		79,89	69,56	7,96	3,77	4,37	0,152	0,057

*Valores significativos à 5% de probabilidade. ** Valores significativo à 1% de probabilidade. ^{ns} não-significativo. CV – coeficiente de variação.

A germinação de sementes de catingueira teve comportamento quadrático em todos os tratamentos (Figura 1A). Verificou-se leve redução na germinação à medida que as concentrações salinas aumentaram em todos os agentes osmóticos. Diferenças significativas foram verificadas ao comparar os sais em cada nível avaliado, no entanto, mesmo no nível mais alto de salinidade em todos os agentes osmóticos, a espécie manteve a germinação acima de 50%. (Tabela 2)

Quando foi utilizada a solução salina com KCl, a germinação aumentou até a concentração de 10 dSm⁻¹, seguida de leve redução, atingindo 77% sob concentração de 25 dSm⁻¹. Já no CaCl₂, promoveu redução inicial, seguido de aumento a partir do nível 15 dSm⁻¹, chegando a 83% de germinação no nível de 25 dSm⁻¹. Por outro lado, o NaCl resultou em queda mais acentuada, indicando maior efeito inibitório na germinação, com apenas 51% de germinação sob concentração de 25 dSm⁻¹, com redução de 40% em comparação à testemunha.

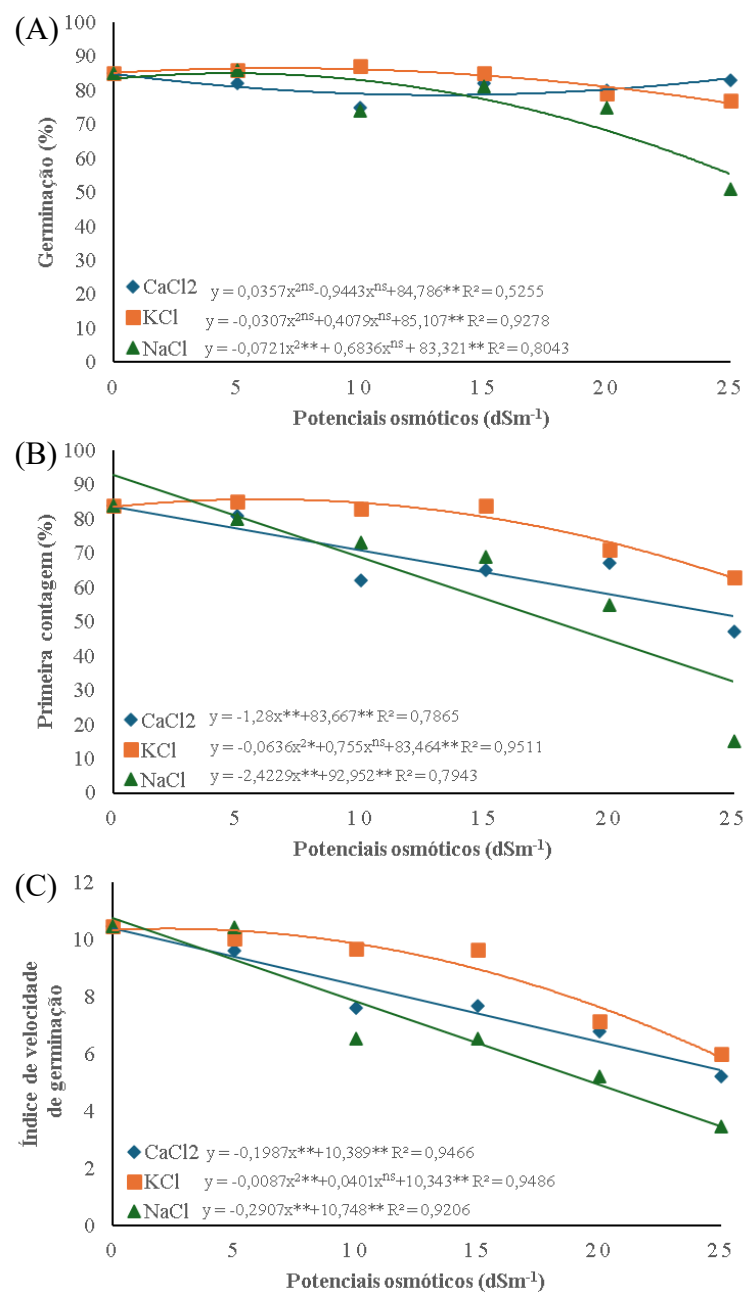


Figura 1: Germinação (A), primeira contagem (B) e índice de velocidade de germinação (C) de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao estresse salino com diferentes agentes osmóticos. Mossoró-RN, 2025.

Tabela 2: Médias de Germinação (G), primeira contagem (PC), e índice de velocidade de germinação (IVG) de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis em função de diferentes sais e potenciais osmóticos. Mossoró-RN, 2025.

Níveis (dSm ⁻¹)	G (%)			PC (%)			IVG		
	CaCl ₂	KCl	NaCl	CaCl ₂	KCl	NaCl	CaCl ₂	KCl	NaCl
0	85 a	85 a	85 a	84 a	84 a	84 a	10,49 a	10,49 a	10,49 a
5	82 a	86 a	86 a	81 a	85 a	80 a	9,63 a	10,05 a	10,45 a
10	75 a	87 a	74 a	62 b	83 a	73 ab	7,6 b	9,7 a	6,54 b
15	82 a	85 a	81 a	65 b	84 a	69 ab	7,7 b	9,66 a	6,53 b
20	80 a	79 a	75 a	67 ab	71 a	55 b	6,79 a	7,15 a	5,21 b
25	83 a	77 a	51 b	47 b	63 a	15 c	5,22 a	5,99 a	3,46 b

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Os resultados demonstraram que na fase germinativa da catingueira, impacto menos severo ao estresse salino quando submetida a concentrações elevadas de KCl e CaCl₂. No entanto, sob o NaCl, houve diminuição da germinação em decorrência do aumento do sal que provocou redução do potencial osmótico das células por conta da restrição hídrica (Matos *et al.*, 2021). Essa diminuição está ligada a dificuldade de absorção de água devido a potenciais osmóticos muito negativos, sobretudo no início da embebição, atuando na absorção de água, impedindo a sequência de eventos relacionados ao processo germinativo (Silva *et al.*, 2019).

A resposta das espécies ao estresse salino pode variar em função do tipo de sal e suas respectivas concentrações. Ao estudar duas espécies florestais da Caatinga, Santos *et al.* (2016) constataram germinação de 79% em catingueira no potencial -0,4 MPa, enquanto no potencial -1,2 MPa, a germinação foi de apenas 4%. Por outro lado, nos potenciais de -0,8 e -1,2 MPa de CaCl₂, a germinação foi de 2% e 0%, respectivamente, divergindo dos resultados encontrados nesta pesquisa. Em lotes de sementes de jucá (*Libidibia ferrea*) a ação do NaCl foi diferenciada entre os lotes ocasionando redução significativa da germinação a partir de 12 dSm⁻¹ (Oliveira *et al.*, 2021). Em sementes de *Tabebuia aurea* submetidas ao estresse salino, Medeiros *et al.* (2023) constataram que dentre os sais empregados, o CaCl₂ foi o que mais prejudicou a germinação e vigor desta espécie seguido pelo NaCl e KCl.

Na primeira contagem de germinação (Figura 1B), verificou-se que o KCl manteve comportamento estatisticamente semelhante ao da testemunha, com discreta redução a partir de 20 dSm⁻¹ e com apenas 25% de redução sob 25 dSm⁻¹. Já para o CaCl₂ e NaCl, a redução na germinação foi perceptível a partir de 5 dSm⁻¹, atingindo quedas expressivas de 44% e 82%, respectivamente, no nível mais alto de salinidade, em comparação a testemunha. Dessa forma,

percebe-se maior sensibilidade do teste de primeira contagem em relação a contagem final, uma vez que apresentou diferenças mais significativas entre os sais.

Nas concentrações osmóticas de KCl houve comportamento quadrático para o índice de velocidade de germinação (IVG) em sementes de catingueira, e comportamento linear para os sais NaCl e CaCl₂ com redução aos valores à medida que foram aumentados os níveis de salinidade (Figura 1C). Ao verificar os resultados, foi possível identificar aumento no IVG até 15 dSm⁻¹ sob o KCl, seguida de redução de 42,89% na concentração de 25 dSm⁻¹ em comparação a testemunha. Já para o CaCl₂ e NaCl, essa redução foi de 50,23% e 67%, respectivamente, em comparação a testemunha.

Resultados semelhantes a este trabalho foram encontrados em sementes de craibeira, cujo aumento das concentrações salinas provocaram redução do IVG em 77%, 73% e 43% no nível de 25 dSm⁻¹ para o NaCl, CaCl₂ e KCl, respectivamente (Medeiros *et al.*, 2023). Já em sementes de pau-de-balsa (*Ochroma pyramidale*) submetidas ao estresse salino de -0,4 MPa a redução foi de 80%, 68% e 36% em CaCl₂, NaCl e KCl, respectivamente (Cruz *et al.*, 2020). Nas espécies tamboril (*Enterolobium contortisiliquum*) e canafistula (*Peltophorum dubium*), os menores valores de IVG ocorreram no tratamento -1,8 MPa, acontecendo o mesmo com pau-formiga (*Triplaris americana* L.) (Dutra *et al.*, 2017).

Ao relacionar as variáveis de germinação, primeira contagem e índice de velocidade de germinação, verificou-se maiores prejuízos na concentração mais elevada de NaCl. Isto pode estar atrelado a alterações no metabolismo de proteínas e nos teores de aminoácidos, em decorrência ao estresse iônico causando alteração na concentração de íons Na⁺ e Cl⁻ no protoplasma (Santos *et al.*, 2016).

Os diferentes agentes osmóticos causaram efeito significativo no comprimento da parte aérea, comprimento da raiz, massa seca da parte aérea e massa seca da raiz de plântulas de catingueira nos níveis de salinidade avaliado (Tabela 3).

No comprimento das plântulas de catingueira os agentes osmóticos KCl e NaCl resultaram comportamento linear à medida que a salinidade das soluções aumentou. Para esses agentes, verificou-se redução de 44% e 76,5% respectivamente, na concentração 25 dSm⁻¹ em comparação a testemunha (Figura 2A). Entre todos os agentes, o NaCl foi o que mais afetou o comprimento da parte aérea, atingindo apenas 1,30 cm.plântulas⁻¹ na concentração de 25 dSm⁻¹. Por outro lado, o CaCl₂ exibiu comportamento quadrático com pequeno incremento no nível 5 dSm⁻¹ seguido por redução de 61,5% no nível mais elevado quando comparado à testemunha. Dentre esses agentes osmóticos testados, o KCl foi o que causou menor redução, com 3,08 cm.plântulas⁻¹ na concentração de 25 dSm⁻¹.

Valores médios para o comprimento da parte aérea em plântulas de catanduva (*Pityrocarpa moniliformis*) foram encontrados por Matos *et al.* (2021), ao realizarem testes de germinação e vigor das sementes sob condições de estresse salino. Segundo esses autores, foram encontrados valores de 1,0 cm, 1,59 cm e 1,66 cm para NaCl, CaCl₂ e KCl, respectivamente. Esses dados corroboram com os resultados obtidos neste trabalho intensificando que dentre os sais testados o NaCl é o que mais compromete a integridade da espécie em estudo. De acordo com Inácio e Smichniu (2021), o estresse salino afeta o desenvolvimento da planta em função do déficit de água, toxidez dos íons e consequente desequilíbrio nutricional. E como resposta, o estresse salino afeta primeiramente o crescimento da planta que é danificada pelos sais do meio exterior regularizados pelos sinais das raízes, em especial pelo ácido abscísico (Inácio; Smichniu, 2021a). Além disso, Taiz e Zeiger (2017) discorrem que o primeiro efeito mensurável do estresse salino é a diminuição do crescimento que decorre da redução da expansão celular gerada pela seca fisiológica produzida e ao efeito tóxico, resultante da concentração de íons no protoplasma.

Tabela 3: Médias do comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis em função de diferentes sais e potenciais osmóticos. Mossoró-RN, 2025.

Níveis (dSm ⁻¹)	CPA (cm/plântula)			CR (cm/plântula)			MSPA (g/plântula)			MSR (g/plântula)		
	CaCl ₂	KCl	NaCl	CaCl ₂	KCl	NaCl	CaCl ₂	KCl	NaCl	CaCl ₂	KCl	NaCl
0	5,53 a	5,53 a	5,53 a	6,05 a	6,05 a	6,05 a	0,237 a	0,237 a	0,237 a	0,083 a	0,083 a	0,083 a
5	6,05 a	5,04 b	5,38 a	7,89 a	6,02 b	7,08 ab	0,254 a	0,199 b	0,209 b	0,081 ab	0,068 b	0,088 a
10	2,28 c	4,64 a	3,22 b	2,33 c	6,48 a	4,77 b	0,071 c	0,175 a	0,125 b	0,031 b	0,068 a	0,061 a
15	3,09 b	4,24 a	2,52 b	3,43 b	5,34 a	3,76 b	0,103 b	0,178 a	0,101 b	0,044 b	0,061 a	0,059 a
20	2,86 a	3,31 a	2,05 b	2,33 a	2,80 a	2,49 a	0,128 a	0,129 a	0,076 b	0,044 a	0,039 a	0,042 a
25	2,13 b	3,08 a	1,3 c	1,94 a	2,36 a	1,45 a	0,110 a	0,133 a	0,033 b	0,045 a	0,037 a	0,021 b

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

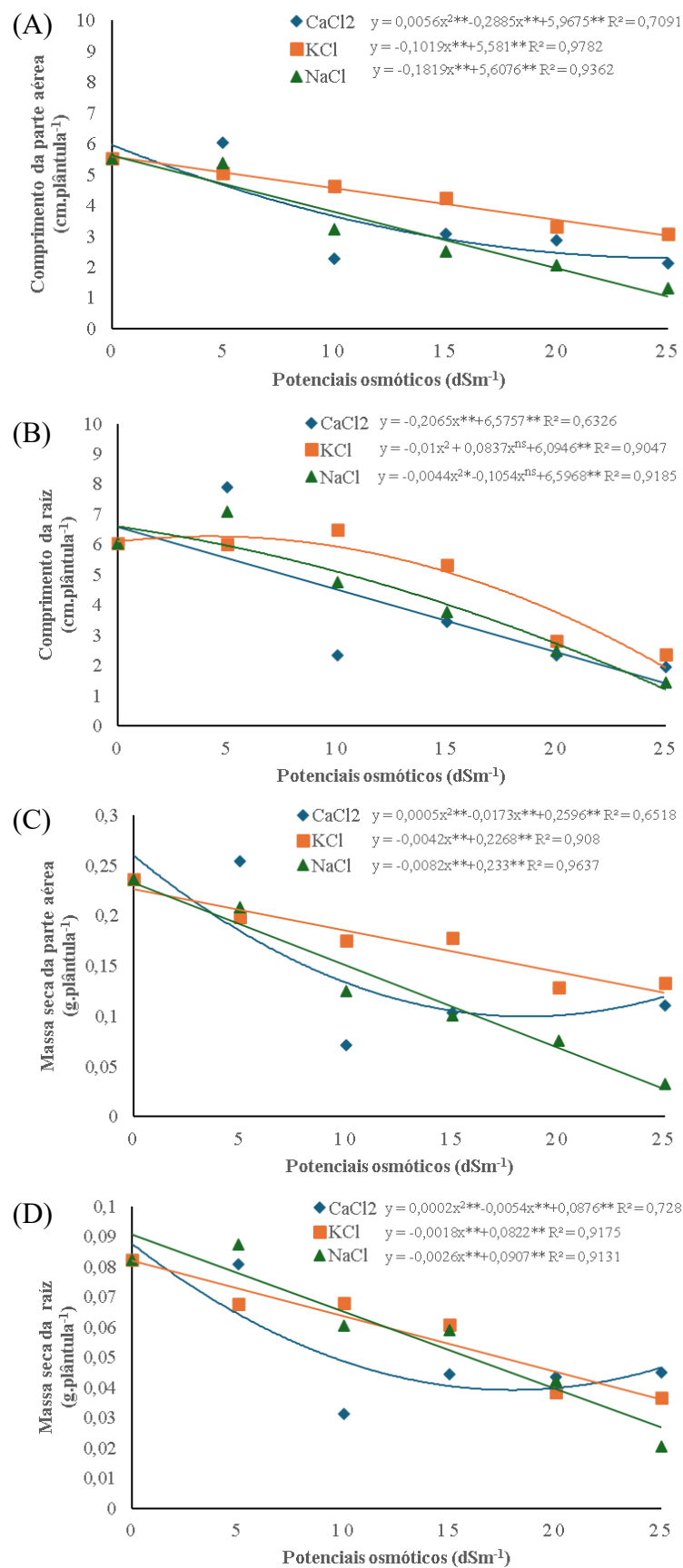


Figura 2: Comprimento da parte aérea (A), comprimento da raiz (B), massa seca da parte aérea (C) e massa seca da raiz (D) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao estresse salino. Mossoró-RN, 2025.

Entre os três agentes osmóticos testados, constata-se que o KCl provocou aumento no comprimento da raiz das plântulas de catingueira até o nível de 10 dSm⁻¹, seguido por redução de 61% em relação a testemunha sob o nível de 25 dSm⁻¹ (Figura 2B). O CaCl₂ e o NaCl indicam leve incremento no nível de 5 dSm⁻¹, seguido por redução acentuada de 67,9% e 76% respectivamente, no nível de 25 dSm⁻¹ em comparação a testemunha. As maiores reduções no comprimento radicular foram verificadas no tratamento com CaCl₂, enquanto o KCl resultou em menor impacto.

De maneira geral, a salinidade afeta negativamente o comprimento radicular, e os diferentes sais testados influenciam essa resposta de forma distinta. Medeiros *et al.* (2023), comprovaram essa resposta no comprimento radicular de *Tabebuia aurea* onde verificaram decréscimo no comprimento radicular à medida que houve o aumento da salinidade na solução, e com isso pode estabelecer que a redução mais severa foi em CaCl₂ seguida de KCl e NaCl na maior concentração. De acordo com Schossler *et al.* (2012), o excesso de sais minerais prejudica o metabolismo celular, principalmente a estabilidade das membranas, comprometendo as reações metabólicas necessárias ao desenvolvimento inicial das raízes.

A análise do efeito da salinidade na massa seca da parte aérea das plântulas de catingueira, observa-se tendência de queda para todos os tratamentos à medida que os potenciais osmóticos aumentam (Figura 2C). O NaCl resultou na maior redução na massa seca, indicando impacto mais severo sobre o desenvolvimento da parte aérea, seguido do CaCl₂ com queda acentuada. Por outro lado, o KCl resultou em resposta menos excessiva à salinidade, sugerindo um efeito menos prejudicial sobre a biomassa da parte aérea das plântulas. Especificamente, verificou-se redução de 43,8%, 53,4% e 86% na concentração de 25 dSm⁻¹ em comparação a testemunha para o KCl, CaCl₂ e NaCl, respectivamente.

Assim como verificado para a massa seca da parte aérea a da raiz também obteve tendência decrescente com o aumento dos potenciais osmóticos para todos os agentes osmóticos testados (Figura 2D). Para a massa seca das plântulas de catingueira verificou-se redução linear nos tratamentos com KCl e NaCl, enquanto o CaCl₂ teve comportamento quadrático. O tratamento com NaCl causou maior redução da biomassa seca das raízes, seguido pelo KCl e CaCl₂. No nível 25 dSm⁻¹, as reduções foram de 75% para o NaCl, 55,5% para KCl e 45,5% para CaCl₂ em comparação a testemunha.

Estudos tem demonstrado os impactos causados pela ação salina no crescimento vegetal, com resultados que variam conforme a espécie e o tipo de sal empregado. Neste sentido, Leal *et al.* (2019), notaram redução gradual no acúmulo de matéria seca nas raízes de mofumbo (*Combretum leprosum*) sob estresse salino com NaCl, KCl e CaCl₂. Esses mesmos autores

verificaram que dentre esses sais o NaCl e KCl foram os mais prejudiciais com valores de matéria seca iguais a zero na condutividade elétrica de 5,5 dSm⁻¹. Além disso, foram encontradas reduções do acúmulo de matéria seca da parte aérea de 46%, 99,9% e 100% quando submetidas aos agentes osmóticos CaCl₂, KCl e NaCl ao nível de 6,5 dSm⁻¹, respectivamente.

Respostas com valores médios para massa seca da parte aérea e da raiz em NaCl de 2,23 mg e 1,63 mg, para KCl de 3,57mg e 1,80 mg, e para o CaCl₂ de 5,19 mg e 3,53 mg, cujos dados corroboram com o trabalho apresentado para NaCl com maior redução (Matos *et al.*, 2021). Já o aumento dos níveis salinos de NaCl, CaCl₂ e KCl a massa seca da raiz de *Tabebuia aurea* ocasionaram redução linear, para a parte aérea e, também, obteve resposta semelhante para KCl, mas para o CaCl₂ e NaCl, foi o oposto, com massa seca diretamente proporcional ao aumento da salinidade (Medeiros *et al.*, 2023).

De acordo com análise de variância, os resultados apresentaram interação significativa a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) entre os sais e os níveis empregados para as variáveis açúcares solúveis totais, aminoácidos livres totais e prolina livre (Tabela 2).

Tabela 4: Resumo da análise de variância para açúcares solúveis totais (AST), aminoácidos livres totais (ALT) e prolina livre (PL) em plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob estresse salino. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de variação	GL	Quadrado médio		
		AST	ALT	PL
		(mg/g MF)	(μ mol/g MF)	
Sais	2	65641,45**	21,180082**	49,91**
Níveis	5	184853,42**	8,169531**	258,67**
Sais x Níveis	10	38315,91**	4,473236**	56,86**
Erro	36			
CV		16,96	20,91	9,39
Médias		491	3,03	14,46

*Valores significativos à 5% de probabilidade. ** Valores significativo à 1% de probabilidade. ^{ns} não-significativo. CV – coeficiente de variação.

Nos ensaios de estresses salino foram avaliados três tipos de sais (NaCl, KCl e CaCl₂). Contudo, para as determinações bioquímicas realizadas nas plântulas, os tratamentos com CaCl₂ não apresentaram padrões distintos de alterações que se ajustassem para fins de comparação com os efeitos constatados para o NaCl e o KCl. Por esta razão, a presente discussão sobre as respostas bioquímicas foi focada apenas nos resultados de NaCl e KCl, que demonstraram influência mais evidente e relevante para a compreensão dos mecanismos na adaptação e osmorregulação da espécie.

Os teores de açúcares solúveis totais (AST) nas plântulas foram influenciados significativamente pelo estresse salino causado tanto pelo NaCl quanto pelo KCl (Figura 3A) com diferença significativa entre os agentes no nível de 25 dSm⁻¹ (Tabela 5). No estresse salino com NaCl, verificou-se que os níveis de AST elevaram de acordo com o aumento da concentração salina, obtendo valor máximo de 880 mg/g de massa fresca, com acúmulo de 237,5% no nível de 25 dSm⁻¹ em comparação a testemunha. Nesse sentido, verifica-se que o NaCl induziu o acúmulo gradual de AST considerando-se como forma de mecanismo da osmorregulação para mitigar os efeitos do estresse osmótico.

Ao verificar o desempenho das sementes submetidas ao estresse pelo KCl, as respostas obtidas foram distintas, obtendo comportamento quadrático (Figura 3A). Os teores de AST aumentaram rapidamente nos níveis iniciais de salinidade, com maior acúmulo chegando a 88,5% no nível de 5 dSm⁻¹ em comparação a testemunha. Diante disso, foi possível verificar um aumento expressivo no teor de AST em 25 dSm⁻¹ com valor de 52,9% em comparação a testemunha. Esse comportamento pode estar associado ao efeito da toxicidade iônica causada pelo excesso do íon K⁺, podendo interferir na homeostase iônica e no metabolismo celular.

Estudos relacionados a dinâmica dos osmólitos no metabolismo das plantas para lidar com o estresse causado pela salinidade, corroboram com os achados desta pesquisa ao evidenciar que o acúmulo dos osmólitos, como açúcares solúveis é uma importante estratégia à tolerância ao estresse salino (Kaur *et al.*, 2024). Além disso, Abuslima *et al.* (2025) verificaram que o estresse salino induziu a mudança do transporte de açúcares solúveis em sorgo, deduzindo uma resposta adaptativa para dispersar os recursos genéticos sob condições adversas.

O ajuste osmótico promovido por açúcares solúveis é essencial para a tolerância ao sal em plantas, viabilizando a manutenção e desenvolvimento do crescimento em condições salinas (Zhang *et al.*, 2023). Diante disso, os resultados obtidos neste estudo em plântulas de catingueira sobre estresse salino com o NaCl refletem uma resposta comum em plantas, onde o aumento dos teores de AST funcionam como mecanismo de osmorregulação para mitigar os efeitos do estresse osmótico.

Açúcares solúveis se elevam significativamente com o aumento da salinidade (Yin *et al.*, 2024). No entanto, esse comportamento não foi verificado ao simular o estresse salino com o KCl no maior nível, diferindo do resultado encontrado por Li *et al.* (2021) que encontraram aumento de açúcares solúveis em mudas de maçã de chá (*Malus hupehensis*) submetida ao estresse por esse mesmo sal. A explicação mais viável está associada ao íon K⁺, que exerce papel fundamental como regulador em diversos processos bioquímicos e fisiológicos nas

plantas, incluindo a síntese de proteína, ativação enzimática, metabolismo de carboidratos e a fotossíntese (Zhu *et al.*, 1998; Huang *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2019) Entretanto, concentrações de K^+ superiores a 50 mM podem provocar estresse salino, e dessa forma interromper o crescimento e metabolismo normal da planta (Hassini *et al.*, 2017; Ntatsi *et al.*, 2017).

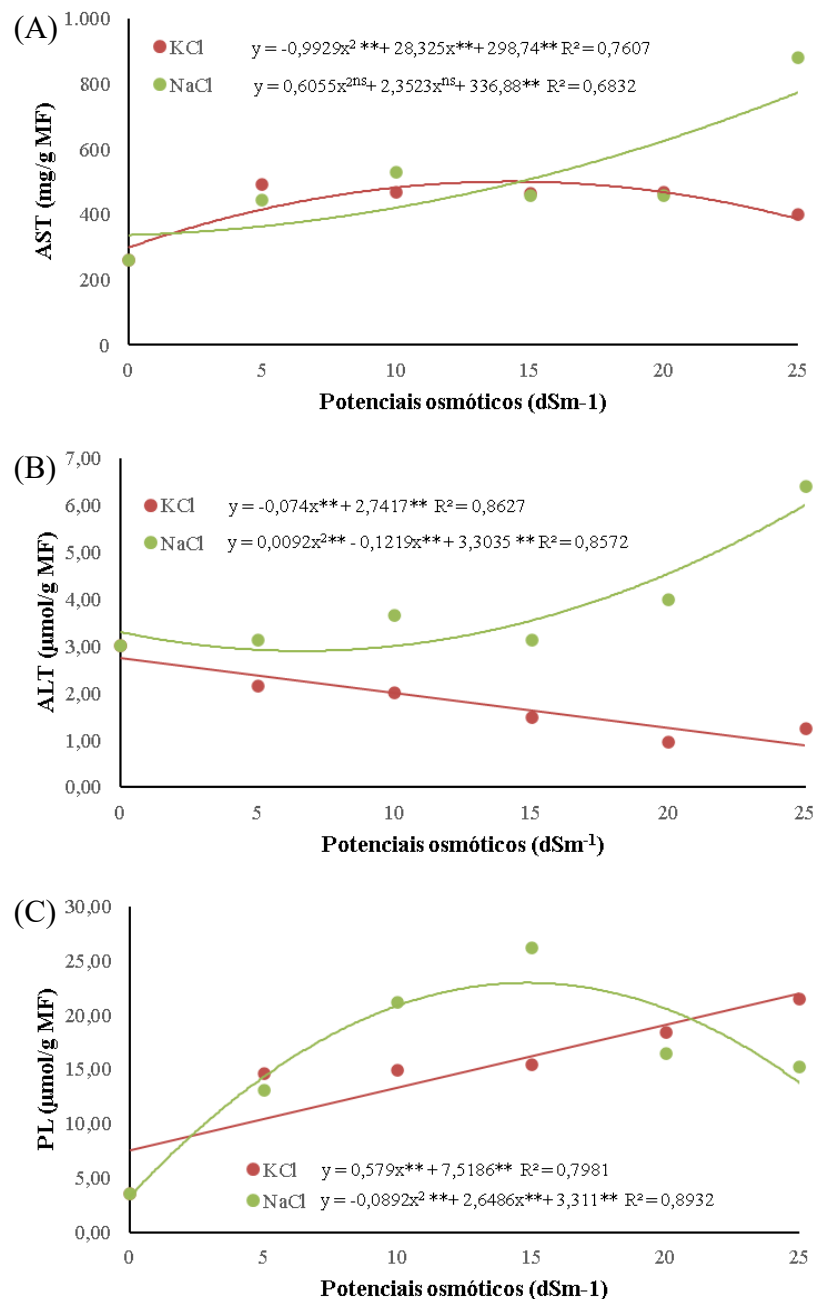


Figura 3: Açúcares solúveis totais (AST) (A), aminoácidos livres totais (ALT) (B) e prolina livre (PL) (C) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao estresse salino. Mossoró-RN, 2025.

Tabela 5: Médias de açúcares solúveis totais (AST), aminoácidos livres totais (ALT) e prolina livre (PL) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis em função de diferentes sais e potenciais osmóticos. Mossoró-RN, 2025.

Níveis (dSm ⁻¹)	AST (mg/g MF)		ALT (μmol/g MF)		PL (μmol/g MF)	
	KCl	NaCl	KCl	NaCl	KCl	NaCl
0	261 a	261 a	3,03 a	3,03 a	3,60 a	3,60 a
5	492 a	445 a	2,15 a	3,13 a	14,66 a	13,14 a
10	468 a	528 a	2,02 b	3,65 a	14,89 b	21,19 a
15	464 a	460 a	1,49 b	3,14 a	15,48 b	26,19 a
20	467 a	457 a	0,95 b	3,98 a	18,4 a	16,45 a
25	399 b	880 a	1,26 b	6,41 a	21,5 a	15,23 b

Médias seguidas por letras minúsculas diferentes na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

A concentração de aminoácidos livres totais (ALT) revelou respostas diferentes entre os agentes osmóticos testados (Figura 3B e Tabela 5). Para os tratamentos com NaCl é possível verificar redução nos níveis de ALT nos potenciais iniciais, acompanhado de aumento acentuado nos níveis mais altos de estresse, com acúmulo máximo de 111,55% no potencial de 25dSm⁻¹ em relação a testemunha. O estresse salino induzido pelo NaCl pode ativar mecanismos adaptativos que inclui o acúmulo de aminoácidos, agindo como solutos compatíveis, auxiliando na osmorregulação, proteção das estruturas celulares e manutenção do metabolismo à diferentes condições.

No caso do KCl, os tratamentos indicaram diminuição gradual nos teores de ALT à medida que a salinidade aumentou. Pelos dados analisados o ajuste da curva propõe que o estresse osmótico estabelecido pelo KCl não estimulou a biossíntese de aminoácidos de forma significativa. Os resultados indicaram maior concentração de ALT na testemunha com 3,03 μmol/g de massa fresca, com redução de 58,42% no nível de 25 dSm⁻¹, quando comparado a testemunha. Essa diminuição contínua sugere que, possivelmente o aumento da salinidade pode ter comprometido a integridade metabólica das plântulas, afetando a capacidade de sintetizar aminoácidos em condições de estresse.

Em condições de estresse salino, as plantas utilizam como estratégia de defesa a produção elevada de aminoácidos. Esses compostos são vitais para reduzir os danos causados tanto pelo efeito tóxico quanto pelo desequilíbrio osmótico induzido pela salinidade (Singh *et al.*, 2013). Além de estabilizarem estruturas e membranas de proteínas (Ashraf e Foolad, 2007), atuam como reservatórios de nitrogênio e eliminadores de EROs (Hayat *et al.*, 2012). Esse comportamento foi verificado nos tratamentos com NaCl. No entanto, no caso do KCl verificou-se diminuição progressiva dos níveis de ALT à medida que o estresse se intensificou.

Esse cenário sugere que o íon K^+ pode atuar de forma mais prejudicial, afetando diretamente o metabolismo dos aminoácidos ou comprometendo a integridade celular. Isso pode impedir a planta de mobilizar osmólitos, diferentemente do que ocorreu sob o estresse com NaCl (Hassini *et al.*, 2017; Ntatsi *et al.*, 2017).

Os teores de prolina livres (PL) variaram significativamente entre os agentes osmóticos testados conforme os níveis salinos aumentaram (Figura 3C e Tabela 5). Sob estresse salino com NaCl, os teores de prolina expressaram comportamento distinto. No nível de 15 dSm^{-1} , houve acúmulo de $26,19 \mu\text{mol prolina/g}$ de massa fresca, seguido por redução dos níveis mais elevados. Esse comportamento induz que embora o NaCl tenha estimulado inicialmente a biossíntese de prolina, o estresse causado por níveis mais altos pode ter superado a capacidade de resposta das plântulas, o que pode ter ocasionado a inibição da síntese ou o consumo de prolina em processos catabólicos para a manutenção celular.

Nos tratamentos com o KCl, o acúmulo de prolina apresentou comportamento crescente partindo da testemunha até o maior nível. O incremento verificado no nível de 25 dSm^{-1} atingiu acúmulo máximo de 497,22% ao se comparar a testemunha. Diante disso, pode-se estabelecer que esse comportamento linear induzido pelo KCl estimulou resposta osmoprotetora, proporcionando a biossíntese de prolina como mecanismo de defesa contra o estresse salino.

A prolina é um osmólito compatível, ou seja, uma molécula que pode se acumular em altas concentrações no citoplasma sem causar danos ou interferir nas funções metabólicas da célula, atuando no alívio dos efeitos adversos do estresse salino na planta (Shukla *et al.*, 2021). Na sua forma livre, tem a função de ajudar a controlar a desidratação celular, estabilizar estruturas subcelulares, eliminar radicais livres e diminuir potenciais redox (Lehmann *et al.*, 2010). Os níveis máximos de acúmulo foram constatados em 15 dSm^{-1} para o NaCl e 25 dSm^{-1} para o KCl. Esse acúmulo está atrelado ao fato de a prolina fornecer redutores para a fosforilação oxidativa, além de produzir trifosfato de adenosina (ATP) nas mitocôndrias, dessa forma auxiliando na restauração do equilíbrio osmótico e no reparo celular dos danos causados pelo sal (Carillo *et al.*, 2011). Por tanto, nesses níveis a prolina desempenhou seu papel de trazer tolerância da planta ao sal, dando ênfase ao seu desempenho crítico na osmorregulação sob estresse salino (Tada *et al.*, 2023).

4. CONCLUSÕES

As sementes de *C. pyramidale* são menos impactadas pelo estresse salino quando submetida a concentrações elevadas de cloreto de potássio e cloreto de cálcio durante o processo germinativo.

O cloreto de sódio a partir do nível de 5 dSm⁻¹ foi o agente osmótico mais prejudicial ao desenvolvimento das plântulas de *C. pyramidale*, ocasionando maiores alterações fisiológicas e respostas bioquímicas significativas de açúcares solúveis totais e aminoácidos livre.

O cloreto de potássio e o cloreto de cálcio ocasionaram menos danos, no entanto, a prolina obteve acúmulo crescente sob estresse do primeiro agente osmótico.

REFERÊNCIAS

- ABUSLIMA, E. et al. Salt stress-induced remodeling of sugar transport: a role for promoter alleles of Sweet13. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 7580, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-90432-2>
- ASHRAF, M. F. M. R.; FOOLAD, MAJID R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and experimental botany**, v. 59, n. 2, p. 206-216, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, n. 1, p. 205-207, 1973. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00018060>. Acesso em: [03 de junho de 2025]
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instruções para análise de sementes florestais**. Brasília: MAPA, 2013, 97 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA, p.309. 2009.
- BRITO, M. E. B. et al. Emergence and morphophysiology of *Sunki mandarin* and other citrus genotypes seedlings under saline stress. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 16, n. 1, p. e0801-e0801, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5424/sjar/2018161-9400>
- CARILLO, P. et al. Salinity stress and salt tolerance. **Abiotic stress in plants-mechanisms and adaptations**, v. 1, p. 21-38, 2011. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=RQmQDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA21&ots=j4Zy1luvu0&sig=dGwP7rd5He699FiGeg5xP2Ji8pI&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false Acesso em: [02 junho de 2025]
- CARVALHO, J. S. B. et al. Estresse salino por NaCl em sementes de paineira e pau de balsa. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 42134-42146, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-667>
- CRUZ, V. S. et al. Efeito da salinidade na germinação e desenvolvimento de plântulas de *Ochroma pyramidale*. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 239-245, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.31413/nativa.v8i2.8266>
- DUTRA, T. R. et al. Efeito da salinidade na germinação e crescimento inicial de plântulas de três espécies arbóreas florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 91, p. 323-330, 2017 DOI: 10.4336/2017.pfb.37.91.1447
- FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2021. Disponível em: <https://www.fao.org/3/cb7654en/cb7654en.pdf> Acesso em: [07 de março de 2025]

FERREIRA, D. F. SISVAR: A. computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019. DOI: <https://doi.org/10.28951/rbb.v37i4.450>

FERREIRA, T. C. et al. Promoção em vigor e germinação em sementes da caatinga pela utilização de técnicas de priming. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 7, n. 1, p. 37 - 45, 2022. DOI: [10.5380/biofix.v7i1.81424](https://doi.org/10.5380/biofix.v7i1.81424)

GUEDES, R. S. et al. Envelhecimento acelerado na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Dalbergia nigra* (Vell.) Fr. All. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 2, p. 443-450, 2011. DOI: [10.5433/1679-0359.2011v32n2p443](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n2p443)

GUO, L. et al. Integrated physiological, biochemical and transcriptomic analyses reveal the mechanism of salt tolerance induced by a halotolerant *Serratia* sp. NTN6 in maize. **Environmental and Experimental Botany**, v. 221, p. 105724, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105724>

HASSINI, I. et al. Effects of seed priming, salinity and methyl jasmonate treatment on bioactive composition of *Brassica oleracea* var. *capitata* (white and red varieties) sprouts. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 97, n. 8, p. 2291-2299, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.8037>

HAYAT, S. et al. Role of proline under changing environments: a review. **Plant Signaling & Behavior**, v. 7, n. 11, p. 1456-1466, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4161/psb.21949>

HUANG, Z. et al. Morpholine-based Gemini surfactant: synthesis and its application for reverse froth flotation of carnallite ore in potassium fertilizer production. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 66, n. 50, p. 13126-13132, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05560>

INÁCIO, J. T. M.; SMYCHNIUK, A. Efeito da salinidade na absorção de água por sementes de *Cedrela fissilis* Vell., *Cordia goeldiana* Huber e *Astronium lecointei* Ducke. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 19, n. 1, p. 42-45, 2021. DOI: [10.30681/rcaa.v19i1.5092](https://doi.org/10.30681/rcaa.v19i1.5092)

KAUR, G. et al. Role of osmolytes dynamics in plant metabolism to cope with salinity induced osmotic stress. **Discover Agriculture**, v. 2, n. 1, p. 59-71, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00070-x>

LAVEZO, A. et al. Estresse osmótico na germinação de sementes de *Petiveria alliacea* L. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 17, n. 4, p. 622-630, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/1983-084X/14_026

LEAL, C. C. P. et al. Initial development of *Combretum leprosum* Mart. seedlings irrigated with saline water of different cationic natures. **Revista Ciência Agronômica**, v. 50, n. 2, p. 300-306, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190035>

LEE, M. H. et al. Divergences in morphological changes and antioxidant responses in salt-tolerant and salt-sensitive rice seedlings after salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 70, p. 325-335, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.047>

LEHMANN, S. et al. Proline metabolism and transport in plant development. **Amino acids**, v. 39, p. 949-962, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-010-0525-3>

LI, T. et al. Resveratrol alleviates the KCl salinity stress of *Malus hupehensis* Rhed. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 650485, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.650485>

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Estados Unidos, v. 2, n. 2, p. 176-77, 1962. DOI: 10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x

MAIA, G. N. **Caatinga**. árvores e arbustos e suas utilidades. 2. ed. Printcolor Gráfica e Editora, Fortaleza, 2012. 413 p.

MATIAS, J. R. et al. Germination of *Cenostigma pyramidale* seeds under different temperatures and salinities. **Informativo ABRATES**, v. 28, n. 1, p. 115-118, 2018. Disponível em: https://www.abrates.org.br/img/informations/50b2d428-6d43-4b83-820b-3bbf1d331f3a_IA_v28n1-Workshop_final.pdf. Acesso em: [03 de junho de 2025].

MATOS, D. C. P. ; OLIVEIRA, D. Y. B. Germinação e vigor de sementes de *Pityrocarpa moniliformis* (Benth.) Luckow & RW Jobson sob condições de estresse salino e hídrico. **Águas e florestas: desafios para conservação e utilização**. Guarujá: Científica Digital, v. 1, p. 277-291, 2021. DOI: 10.37885/210404395

MEDEIROS, H. L. S. et al. Desempenho fisiológico de sementes de *Tabebuia aurea* submetidas a estresses abióticos. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 4, p. 962-970, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n423rc>

NOGUEIRA, N. et al. Estresse salino na emergência e desenvolvimento inicial de plântulas de jurema-branca. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 3, p. 1081-1087, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.34062/afs.v7i3.8624>

NTATSI, G. et al. Salinity source alters mineral composition and metabolism of *Cichorium spinosum*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 141, p. 113-123, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.07.002>

OLIVEIRA, V. N. S. et al. tolerance and pre-germinative treatments in jucá seeds (*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz var. *ferrea*) submitted to salinity. **International Journal of Development Research**, v. 11, n. 8, p. 49692-49698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.22671.08.2021>

SÁ, F. V. S. et al. Seed germination and vigor of different cowpea cultivars under salt stress. **Comunicata Scientiae**, v. 7, n. 4, p. 450-455, 2016. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6294730>. Acesso em [03 de junho de 2025].

SANTOS, C. A. et al. Germinação de duas espécies da caatinga sob déficit hídrico e salinidade. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 87, p. 219-224, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.87.1017>

SANTOS, W. S. et al. Firewood and forage production from *Poincianella pyramidalis* (Tul.) LP Queiroz subjected to anual pruning. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 89-103, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832500>

SCHOSSLER, T. R. et al. Salinidade: efeitos na fisiologia e na nutrição mineral de plantas. **Enciclopédia Biosfera**, v. 8, n. 15, p. 1563-1578, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/62170387/Salinidade_Efeitos_na_fisiologia_e_na_nutri%C3%A7%C3%A3o_mineral_de_plantas7UZNZJQ4pR9JTpVg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: [03 de junho de 2025].

SHAN, L. et al. Effects of salicylic acid on growth, physiology, and gene expression in rice seedlings under salt and drought stress. **Plant Stress**, v. 11, p. 100413, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.stress.2024.100413>

SHUKLA, M. R. et al. Salt stress in *Arabidopsis thaliana* seedlings: Role of indoleamines in stress alleviation. **Melatonin Research**, v. 4, n. 1, p. 70-83, 2021. DOI: <http://10.32794/mr11250082>

SILVA, C. et al. Efeito do estresse salino na germinação de *Piptadenia stipulacea* (Benth) Ducke. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 20, n. 2, p. 63-65, 2024. DOI: <https://doi.org/10.30969/3dnaet11>

SILVA, D. C. D. et al. Estresse salino e diferentes temperaturas alteram a fisiologia em sementes de *Clitoria fairchildiana* Howard. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 3, p. 1129-1141, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509813588>

SINGH, P. et al. Salt stress resilience in plants mediated through osmolyte accumulation and its crosstalk mechanism with phytohormones. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 1006617, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1006617>

TADA, Y. et al. Salt tolerance and regulation of Na⁺, K⁺, and proline contents in different wild turfgrasses under salt stress. **Plant Biotechnology**, v. 40, n. 4, p. 301-309, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5511/plantbiotechnology.23.0721a>

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

WU, X. et al. Investigating the effect of biochar on the potential of increasing cotton yield, potassium efficiency and soil environment. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 182, p. 109451, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109451>

YEMM, E. W.; COCKING, E. C. The determinai-o of amino acid with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, n. 2, p. 209-214, 1955. DOI: <https://doi.org/10.1039/AN9558000209>

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plants extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v. 57, n. 3, p. 508-514, 1954. DOI: <https://doi.org/10.1042/bj0570508>

YIN, D. et al. Effects of salinity on salt tolerance of *limonium bicolor*, a salt-secretion halophyte in the coastal areas around bohai sea of China. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 71, n. 4, p. 153, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1021443724606621>

ZHANG, Y. et al. Plants' response to abiotic stress: Mechanisms and strategies. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 13, p. 10915, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms241310915>

ZHANG, R. et al. Effect of salt-alkali stress on seed germination of the halophyte *Halostachys caspica*. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 13199, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61737-5>

ZHU, J.; LIU, J; XIONG, L. Genetic analysis of salt tolerance in Arabidopsis: evidence for a critical role of potassium nutrition. **The Plant Cell**, v. 10, n. 7, p. 1181-1191, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1105/tpc.10.7.1181>

CAPÍTULO 3

TRATAMENTOS PRÉ-GERMINATIVOS EM SEMENTES DE *Cenostigma pyramidale* (TUL) GAGNON & G.P. LEWIS PARA ATENUAÇÃO DO DÉFICIT HÍDRICO

RESUMO

Cenostigma pyramidale, mais conhecida como catingueira é uma espécie florestal encontrada no ecossistema Caatinga e se destaca pela importância ecológica e econômica. No entanto, fatores abióticos, como o déficit hídrico, podem comprometer o desempenho das suas principais funções, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento. O uso de mitigadores para amenizar os efeitos prejudiciais da escassez hídrica se constitui em alternativa promissora para as espécies vegetais, principalmente durante a germinação e crescimento inicial de plântulas. Diante disso, objetivou-se avaliar a eficácia de tratamentos pré-germinativos na mitigação do déficit hídrico simulado com soluções de polietilenoglicol (PEG 6000) durante a germinação e desenvolvimento inicial de plântulas de catingueira. O delineamento experimental foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições de 25 sementes. Os tratamentos foram compostos por: T1 (controle), T2 (-0,1 MPa), T3 (-0,2 MPa), T4 (-0,1 MPa + ácido salicílico); T5 (-0,2 MPa + ácido salicílico); T6 (-0,1 MPa + ácido giberélico); T7 (-0,2 MPa + ácido giberélico); T8 (-0,1 MPa + hidrocondicionamento) e T9 (-0,2 MPa + hidrocondicionamento). As sementes dos tratamentos T4, T5, foram submetidas a pré-embebição durante 12 horas em ácido salicílico (1 mM.L⁻¹), T6 e T7 em ácido giberélico (0,5 mM.L⁻¹) e T8 e T9 hidrocondicionamento por 12 horas (água destilada). As variáveis morfofisiológicas analisadas foram a germinação, primeira contagem de germinação, índice de velocidade de germinação, comprimento radicular e da parte aérea, massa seca da raiz e parte aérea das plântulas. As análises bioquímicas foram açúcares solúveis totais, aminoácidos livres totais e prolina livre. O déficit hídrico no menor potencial de -0,1 MPa não comprometeu a germinação de *C. pyramidale*, mas prejudicou o vigor. O hidrocondicionamento e o ácido giberélico proporcionaram melhorias no vigor das plântulas. Os atenuadores aumentaram os teores de açúcares solúveis, aminoácidos livres e prolina, em especial o ácido salicílico.

Palavras-chave: Fabaceae; estresse abiótico; ácido salicílico; ácido giberélico; hidrocondicionamento.

1. INTRODUÇÃO

Exclusivamente brasileiro, o ecossistema Caatinga ocupa grande parte do semiárido do país e se destaca por sua singular biodiversidade, marcada por elevados índices de endemismo e paisagens. Apesar de sua relevância ecológica, esse ecossistema ambiental enfrenta graves ameaças, como a degradação acelerada de seus recursos naturais e adversidades climáticas, principalmente a escassez e a irregularidade pluviométrica, além das limitações edáficas (Drumond *et al.*, 2021). A combinação desses fatores impede o desenvolvimento de algumas espécies florestais, dificultando sua multiplicação e levando ao risco de extinção (Matias *et al.*, 2018).

Dentre as espécies florestais que possuem importância para o ecossistema Caatinga, destaca-se a *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnan G.P. Lewis, conhecida popularmente como catingueira. Esta espécie pertence à família Fabaceae, com ocorrência na região Norte e ampla distribuição na região Nordeste, principalmente na Caatinga (Reflora, 2024). Seu uso se dá principalmente pela qualidade da madeira, importância ecológica na composição e reconstituição de áreas degradadas (Maia, 2012; Ferreira *et al.*, 2022). Apesar de ser uma espécie adaptada as condições ambientais da região semiárida, fatores como altas temperaturas e irregularidade de chuvas podem prejudicar a germinação e estabelecimento inicial da espécie, considerados os estágios que mais demonstram sensibilidade a este estresse abiótico (Nóbrega *et al.*, 2022).

A disponibilidade hídrica é um elemento essencial para a germinação das sementes, atuando diretamente em seu desenvolvimento inicial (Marcos-Filho, 2015). A falta de água pode prejudicar significativamente a eficiência desse processo, afetando não apenas a taxa de germinação, mas também sua velocidade e uniformidade (Leal *et al.*, 2020). Esses efeitos ocorrem devido a mudanças bioquímicas e metabólicas que interferem na hidratação dos tecidos internos da semente. Além disso, a atividade respiratória e a capacidade de quebrar e utilizar reservas nutricionais fundamentais para o crescimento do embrião também são impactadas (Nóbrega *et al.*, 2021). Com isso, induz a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), ocasionando estresse oxidativo nos tecidos das sementes (Khan *et al.*, 2019).

Diante disso, torna-se imprescindível implementar estratégias que minimizem os efeitos causados pelo déficit hídrico, e o pré-tratamento de sementes pode ser uma delas. O uso de atenuadores no pré-tratamento de sementes vem apresentando resultados satisfatórios principalmente para sementes de hortaliças e grandes culturas, porém, ainda pouco aplicado em espécies florestais. Dentre esses atenuadores, destaca-se a utilização de fitormônios como o

ácido salicílico, o ácido giberélico e a técnicas de hidrocondicionamento, que atuam em vários processos fisiológicos, auxiliando na germinação das sementes, ativação da fase inicial da germinação, absorção de nutrientes, expansão e divisão celular (Ryo; Cho, 2015; Nóbrega *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2021). Respostas positivas com o uso de atenuadores sob condições de estresses abióticos foram evidenciados em espécies de *Piptadenia moniliformis* (Ramalho *et al.*, 2020), *Cereus jamacaru* (Nobrega *et al.*, 2021) e *Hymenaea courbaril* (Souza *et al.*, 2021).

Diante da relevância que a catingueira apresenta para o ecossistema Caatinga, torna-se imprescindível a adoção de estratégias que favoreçam sua multiplicação em condições de déficit hídrico, como forma de conservação da espécie e fortalecimento dos programas de reflorestamento e recuperação de áreas degradadas. A viabilidade de sementes em decorrência da escassez de água representa um fator crítico para a regeneração natural e do manejo sustentável de espécies nativas. Dessa forma, a utilização de tratamentos pré-germinativos com utilização de mitigadores para estresses abióticos pode não apenas melhorar o desempenho germinativo e o estabelecimento inicial de plântulas de catingueira, mas também contribuir para sua conservação e valorização de projetos de restauração florestal. Nesse contexto, objetivou-se avaliar os efeitos dos tratamentos pré-germinativos em sementes de catingueira para atenuação do déficit hídrico.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local de condução do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Análise de Sementes (LAS), pertencente ao Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais (DCAF), da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Mossoró-RN (5°11' S e 37° 20' W, e 18 m altitude), entre os meses de agosto de 2024 a janeiro de 2025.

2.2 Aquisição das sementes

As sementes de catingueira foram colhidas manualmente de frutos maduros em árvores situadas no Parque Nacional da Fuma Feia, inserido entre os municípios de Mossoró/RN e Baraúna/RN (5°4'14,88" S e 37°32'1,51" O), em julho de 2023. Realizada as coletas, os frutos foram encaminhados para o Laboratório de Análises de Sementes, debulhados e realizado o beneficiamento manual com a retirada do material inerte e sementes mal formadas. Após o beneficiamento, as sementes foram acondicionadas em embalagens de plástico PET (Politereftalato de Etileno) e armazenadas em ambiente controlado (16 ± 2 °C; 40 % UR).

Antes da instalação do experimento foi determinado o teor de água das sementes através do método da estufa a 105 ± 3 °C durante 24 horas (Brasil, 2009).

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições de 25 sementes para cada tratamento. Os tratamentos consistiram em: T1 = controle (sem déficit hídrico), T2 = -0,1 MPa, T3 = -0,2 MPa, T4 = -0,1 MPa + ácido salicílico; T5 = -0,2 MPa + ácido salicílico; T6 = -0,1 MPa + ácido giberélico; T7 = -0,2 MPa + ácido giberélico; T8 = -0,1 MPa + hidrocondicionamento e T9 = -0,2 MPa + hidrocondicionamento. Inicialmente, realizou-se pré-testes para a determinação dos potenciais utilizados.

2.4 Determinação da curva de embebição

Para determinar o tempo de hidratação das sementes nos agentes mitigadores, realizou-se a curva de embebição (Figura 1). Para isto, duas repetições de 50 sementes foram pesadas em

balança analítica digital (0,001 g). Em seguida foram dispostas em três folhas de papel toalha, previamente umedecidas com água destilada na proporção de 2,5 vezes o peso seco do papel, e mantidas em câmara de germinação a 25 °C. As sementes foram pesadas em intervalos de tempo pré-determinados até a emissão da raiz primária. O período de hidratação foi ajustado para garantir que as sementes absorvessem o agente elicitador sem que ocorresse a protrusão radicular. Assim, determinou-se que o período ideal de pré-condicionamento fosse de 12 horas.

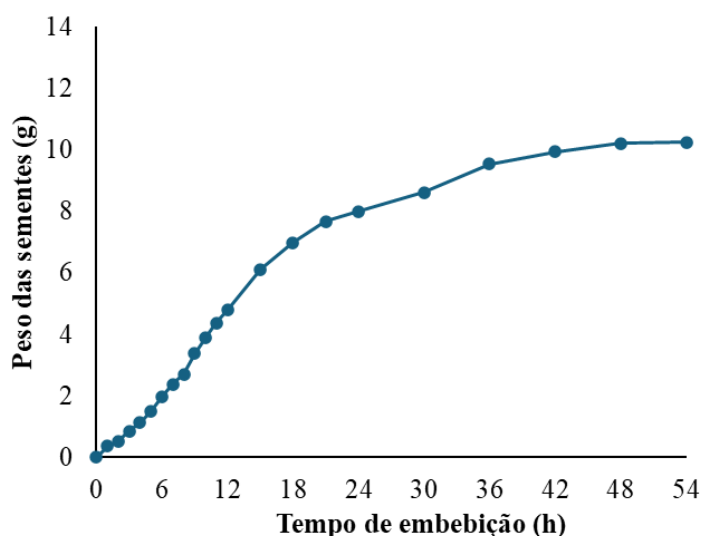


Figura 1: Determinação da curva da embebição em sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis. Mossoró-RN, 2025.

2.5 Pré-tratamento das sementes

Antes de realizar o teste de germinação as sementes foram tratadas com fungicida Manfil® na dose de 1,5 g/Kg de sementes para evitar contaminações por fungos.

As sementes foram embebidas por 12 horas, em três folhas de papel toalha umedecido com 2,5 vezes o peso seco do papel em soluções dos atenuadores: ácido salicílico (1 mM.L⁻¹) e ácido giberélico (0,5 mM.L⁻¹), água destilada e o tratamento controle (sem embebição).

2.6 Instalação do teste de germinação sob condições de déficit hídrico

As sementes pré-tratadas com os atenuadores e a testemunha foram semeadas em papel toalha umedecidos com soluções de PEG 6000 com quantidade igual a 2,5 vezes o peso seco do papel. Em seguida, os rolos foram formados e acondicionados em sacos plásticos transparente para a manutenção da umidade do substrato. Os rolos foram colocados em

germinadores *Biochemical Oxygen Demand* (B.O.D) à temperatura de 25 ± 2 °C com fotoperíodo de 10 horas, durante 11 dias. As soluções de PEG 6000 foram preparadas de acordo com Villela; Doni Filho; Sequeira (1991).

As variáveis consideradas para as análises fisiológicas foram:

a) Germinação: expresso o potencial de plântulas normais aos 11 dias, levando em consideração o desenvolvimento da raiz principal e do hipocótilo visível, seguindo recomendações de Brasil (2009), com os resultados expressos em porcentagem. A duração do teste de germinação para a catingueira é de 14 dias (Brasil, 2013). No entanto, foram considerados 11 dias para esse teste em virtude do ataque de fungos, a fim de evitar a perda das plântulas por contaminação.

b) Primeira contagem: realizada no sétimo dia após a semeadura, sendo contabilizadas plântulas com o eixo hipocótilo-radicular desenvolvido (Brasil, 2013).

c) Índice de velocidade de germinação (IVG): realizado simultaneamente ao teste de germinação, com contagens diárias de sementes germinadas, a partir do dia seguinte à semeadura até o final do teste aos 11 dias. O índice foi determinado conforme Maguire (1962), em que o cálculo foi feito por meio do somatório das razões entre o número de sementes germinadas em cada dia do teste e o número de dias decorridos desde a semeadura até a germinação.

$$IVG = \frac{G1}{N1} + \frac{G2}{N2} + \dots + \frac{Gn}{Nn} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

IVG = Índice de velocidade de germinação;

G1, G2, Gn = número de plântulas na primeira, na segunda e na última contagem, e

N1, N2, Nn = número de dias de semeadura à primeira, segunda e última contagem.

d) Comprimento da parte aérea e raiz primária: foram escolhidas aleatoriamente dez plântulas normais, mensuradas com o auxílio de régua graduada em centímetros (cm). Na parte aérea, a medição foi feita da base do colo ao ápice da plântula. Já o comprimento da raiz primária foi medido da base do colo a extremidade da raiz primária das plântulas. Os resultados foram expressos em centímetro por plântulas (cm/plântulas).

e) Massa seca da parte aérea e da raiz: após a medição da parte aérea e da raiz, foi realizada a separação de ambas as partes com o auxílio de uma tesoura, em seguida, as partes

foram acondicionadas separadamente e identificadas de acordo com os tratamentos em sacos de papel Kraft, sendo postas para secar em estufa de circulação de ar a 65 °C durante 72 horas, até atingirem peso constante. Após a secagem, foi realizada a pesagem do material em balança analítica com precisão (0,001 g). Os resultados foram expressos em miligramas por plântulas (mg/plântulas).

Para as análises bioquímicas foram coletadas amostras a partir da massa fresca das partes aérea e da raiz das plântulas após 11 dias de exposição ao estresse. Com esse material apropriadamente congelado e armazenado, foi inicialmente obtido o extrato bruto, que consistiu na pesagem de 0,2 g massa fresca das plântulas postas em tubos hermeticamente fechados e acrescidos 3 mL de álcool 60% no qual foi realizada a maceração desse material de forma automática. Feita a maceração, os tubos passaram para o banho maria a temperatura de 60 °C por 20 minutos, seguido a isso foram centrifugados a 10.000 rpm por 10 minutos a 4 °C de temperatura, e em seguida foi coletado o sobrenadante para a determinação das variáveis seguintes:

f) Açúcares solúveis totais (AST): determinado pelo método da antrona, seguindo metodologia proposta por Yemm e Willis (1954), por meio da curva padrão de glicose, com resultados expressos em mg de glicose/g⁻¹ de massa fresca.

g) Aminoácidos livres totais (ALT): a determinação ocorreu pelo método da ninhidina ácida (Yemm; Cocking, 1955), por meio da curva padrão de glicina, com resultados expressos em mg de glicina/g⁻¹ de massa fresca.

h) Prolina livre (PL): determinação de acordo com a metodologia proposta por Bates *et al.* (1973), para a quantificação do teor de prolina livre, sendo os resultados expresso em µmol prolina/g⁻¹ de massa fresca.

Os dados para avaliação do efeito dos agentes mitigadores foram submetidos a análise de variância com as médias comparadas pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas através do Software SISVAR[®] (Ferreira, 2019).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As sementes de catingueira utilizadas nesta pesquisa tiveram teor de água de 11,7%, quando armazenadas em embalagens de plástico e mantidas em ambiente controlado, com temperatura de 16 ± 2 °C com umidade relativa de 40%.

Pelos resultados obtidos na análise de variância, verificou-se efeito significativo dos tratamentos para a maioria das variáveis analisadas (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo da análise de variância para germinação (G), primeira contagem de germinação (PCG), índice de velocidade de germinação (IVG), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca da raiz (MSR) em plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de variação	Quadrado médio							
	GL	G	PCG	IVG	CPA	CR	MSPA	MSR
		(%)			(cm/plântulas)		(mg/plântulas)	
Tratamento	8	41,44 ^{ns}	35,78 ^{ns}	12,49 ^{**}	4,17 ^{**}	1,57 ^{ns}	0,00 ^{**}	0,00 ^{**}
Erro	27							
CV		7,51	10,83	12,75	8,00	14,13	9,44	10,48
Médias		85,89	78,22	9,50	5,30	6,26	0,19	0,09

*Valores significativos à 5% de probabilidade. ** Valores significativo à 1% de probabilidade.

^{ns} não-significativo. CV – coeficiente de variação.

Ao analisar a germinação e a primeira contagem de germinação, constatou-se que os diferentes tratamentos, envolvendo tanto o déficit hídrico quanto a aplicação de atenuadores, não promoveram efeitos significativos sobre as variáveis analisadas (Figura 2A e 2B). A germinação apresentou médias acima de 70%, alcançando 90% no tratamento sob déficit hídrico no potencial -0,1 MPa. Da mesma forma, para a primeira contagem, as médias também foram superiores a 70% com maior porcentagem verificada na testemunha com 84%. Estes resultados indicam, que nas condições experimentais avaliadas, a porcentagem final de germinação e estabelecimento inicial de plântulas de catingueira não foram severamente comprometidas pelos níveis de déficit hídrico aplicados ou não foram significativamente melhorados pelos atenuadores.

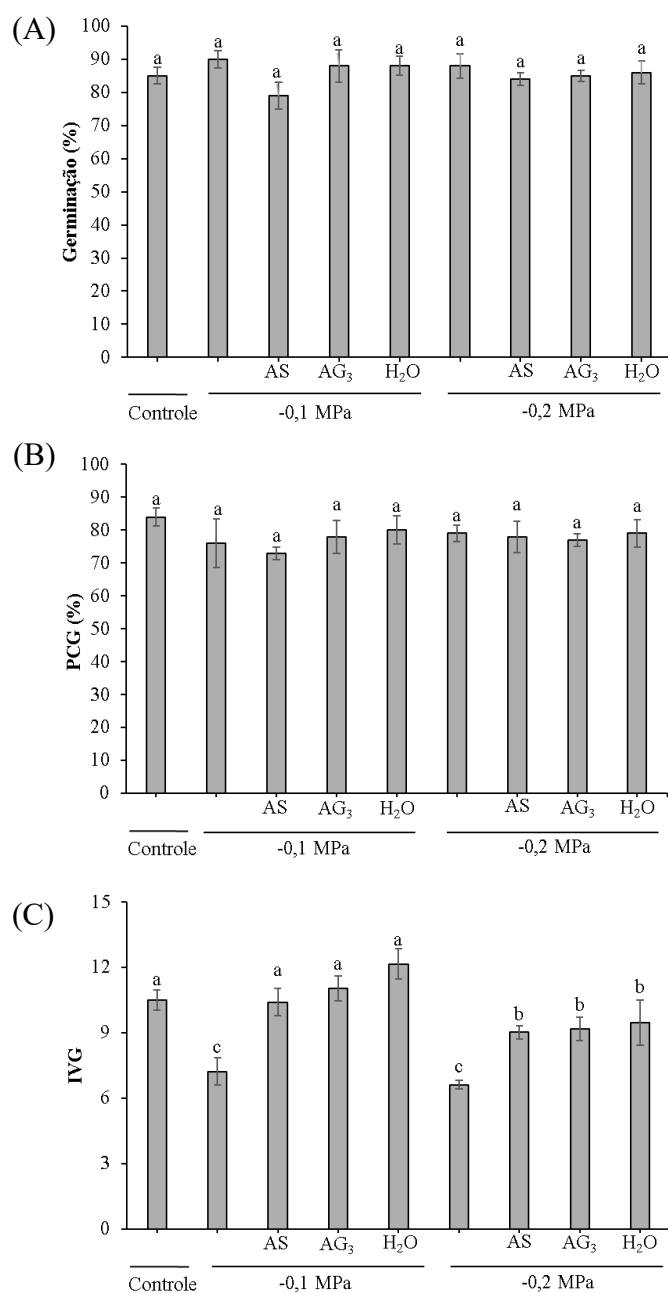


Figura 2: Germinação (A), primeira contagem de germinação (B) e índice de velocidade de germinação (C) de sementes de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

Resultados semelhantes a esta pesquisa foram encontrados por Nóbrega *et al.* (2024), quando submeteram sementes dessa mesma espécie pesquisada ao osmocondicionamento com ácido salicílico. Portanto, mesmo sobre a imposição do déficit hídrico a germinação se manteve elevada, no entanto, embora níveis mais severos -1,2 MPa, a catingueira reduziu sua germinação e o vigor, demonstrando certa tolerância sob condições moderadas. Com os

resultados desta pesquisa é possível verificar que sob o potencial de -0,1 MPa, as sementes mantêm desempenho elevado e os atenuadores fisiológicos só se destacam quando o déficit hídrico é mais severo.

Em contraste aos resultados obtidos na germinação e na primeira contagem, o índice de velocidade de germinação (IVG) foi altamente influenciado pelos tratamentos, demonstrando que, embora a porcentagem final de germinação não tenha sido afetada, a velocidade do processo germinativo expressou sensibilidade às condições de déficit hídrico (Figura 2C). Os menores valores encontrados para o IVG ocorreram nos tratamentos sob o déficit hídrico isolado, nos potenciais -0,2 MPa e -0,1 MPa, com médias de 6,61 e 7,22, respectivamente. No entanto, o tratamento com o hidrocondicionamento (H₂O) no potencial -0,1 MPa promoveu o maior IVG (12,14). Isso sugere que o hidrocondicionamento no nível de estresse a -0,1 MPa foi eficaz para acelerar o processo germinativo. Além disso, o tratamento com atenuador (-0,1 MPa + AG₃) não diferiu do tratamento de -0,1 MPa + H₂O com IVG de (11,03). Dessa forma, pode-se inferir que os atenuadores, em específico o hidrocondicionamento e o ácido giberélico no potencial de -0,1 MPa, são capazes de melhorar o vigor, mesmo quando o déficit hídrico não afeta a porcentagem final de germinação.

Os achados implicam que o IVG foi sensivelmente afetado pelos tratamentos com hidrocondicionamento e o ácido giberélico, promovendo acelerado processo germinativo em -0,1 MPa, enquanto o estresse isolado retardou significativamente a germinação. Estudos recentes realizados por Carvalho *et al.* (2023) com espécies tropicais corroboram com os resultados encontrados nesta pesquisa, evidenciando que em sementes de pitaya (*Hylocereus undatos*) houve aumento do IVG em 17% com o hidrocondicionamento e 63% com ácido giberélico sob déficit hídrico. Já Santos; Junior; Silva (2024) encontraram resultados satisfatórios para o IVG após aplicar dois ciclos de hidrocondicionamento em sementes de feijão-do-mato (*Sesbania virgata*) sob déficit hídrico moderado nas concentrações de -0,2 a -0,8 MPa.

O aumento proporcionado pelo hidrocondicionamento está atrelado a capacidade da semente precisar de menor quantidade de água sob déficit hídrico para retomada do crescimento embrionário, devido maior parte das reservas já terem sido mobilizadas (Marcos-Filho, 2015). Já o ácido giberélico é um hormônio tido como ativador enzimático endógeno, o qual promove a germinação e, quando ocorre a aplicação exógena, influencia no metabolismo proteico, dessa forma podendo dobrar a taxa de síntese proteica das sementes (Braun *et al.*, 2010). De acordo com Taiz *et al.* (2017), a utilização desse hormônio em quantidades suficientes, impulsiona no

aumento da germinação, em decorrência do alongamento celular que possibilita a raiz primária romper os tecidos que restringem seu crescimento.

O comprimento da parte aérea das plântulas foi significativamente afetado pelos tratamentos (Figura 3A). O tratamento com o ácido giberélico no potencial -0,2 resultou em menor valor médio, com 3,67 cm. Por outro lado, os maiores comprimentos foram verificados nos tratamentos -0,1 MPa + AG₃ e -0,1 MPa + H₂O e no potencial -0,1 MPa isolado, com médias de 6,57 cm, 6,45 cm e 6,42 cm, respectivamente. Esses resultados indicam que o déficit hídrico mais severo (-0,2 MPa) especialmente quando associado ao ácido giberélico, pode prejudicar o desenvolvimento da parte aérea. Em contrapartida, o déficit hídrico menos severo a (-0,1 MPa) pôde mitigar esses efeitos ou até promover um crescimento semelhante ou superior ao tratamento controle.

O comprimento radicular não foi influenciado pelos tratamentos (Figura 3B). As médias variaram entre 5 cm no tratamento -0,1 MPa + AS a 7,30 cm no -0,2 MPa + H₂O. Embora o teste aplicado tenha agrupado os tratamentos no mesmo grupo estatístico, o -0,2 MPa + H₂O causou maior média de comprimento radicular, deferindo do -0,1 MPa + AS. Isso implica que, ainda que o efeito geral não tenha sido estatisticamente robusto, a técnica de hidrocondicionamento em estresse mais elevado pode ter resposta positiva no desenvolvimento do sistema radicular, enquanto o ácido salicílico em estresse mais acentuado pode ter efeito reverso.

De acordo com os resultados obtidos para o CPA e o CR, o crescimento da parte área de *C. pyramidale* foi favorecido pelos tratamentos com hidrocondicionamento e ácido giberélico sob menor déficit hídrico (-0,1 MPa), resultando em comprimentos semelhantes ou superiores ao controle. Por outro lado, o estresse mais severo (-0,2 MPa + AG₃) prejudicou esse desenvolvimento. Já o comprimento radicular, de modo geral, não foi estatisticamente afetado, embora o tratamento com hidrocondicionamento sob potencial de -0,2 MPa tenha obtido maior média, sugerindo possível efeito positivo sob estresse mais intenso.

Ao avaliarem sementes de catanduva (*Piptadenia moniliformis*) sob estresse salino, Ramalho *et al.* (2020) verificaram melhor desenvolvimento da parte aérea e radicular das plântulas quando submetidas ao hidrocondicionamento. Quanto as reduções encontradas para essas variáveis, tais danos podem estar atrelado a maiores concentrações de EROs, no qual compromete o processo de divisão e alongamento celular (Guo *et al.*, 2023). Nesse contexto, o ácido giberélico atua promovendo a divisão e alongamento celular, resultando em maior número de células e, conseqüentemente, no aumento do comprimento das plântulas em resposta à aplicação desse regulador vegetal (Taiz *et al.*, 2017).

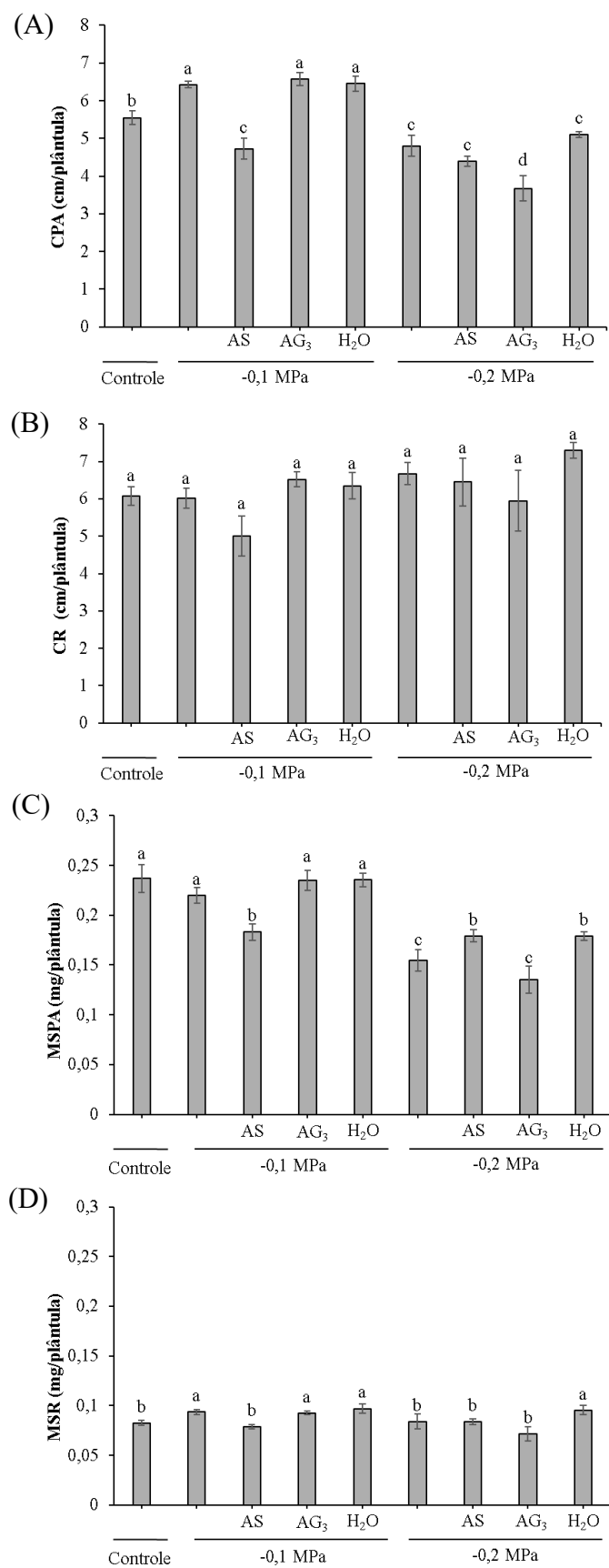


Figura 3: Comprimento da parte aérea (A), comprimento da raiz (B), massa seca da parte aérea (C) e massa seca da raiz (D) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

A massa seca da parte aérea foi significativamente influenciada pelos tratamentos (Figura 3C). O menor acúmulo de matéria seca foi verificado no tratamento -0,2 MPa + AG₃ com média de 0,135 mg. Por outro lado, os tratamentos testemunha, -0,1 MPa + H₂O e -0,1 MPa + AG₃ foram os que tiveram as maiores massas secas da parte aérea sendo estatisticamente semelhante entre si e o tratamento com apenas o potencial -0,1 MPa, com acúmulos de 0,236 mg, 0,235 mg, 0,235 mg e 0,219 mg, respectivamente. Dessa forma é possível deduzir que o déficit hídrico mais leve e a aplicação da técnica de hidrocondicionamento ou AG₃ no nível -0,1 MPa foram eficientes em manter ou melhorar a biomassa da parte aérea.

Assim como a MSPA, a massa seca da raiz também obteve efeitos significativos aos tratamentos (Figura 3D). Menor acúmulo de biomassa radicular foi verificado no tratamento -0,2 MPa + AG₃, com 0,071 mg. No entanto, os tratamentos -0,1 MPa + H₂O, -0,2 MPa + H₂O e apenas o potencial -0,1 Mpa resultaram em maiores massas secas radiculares com médias de 0,097 mg, 0,095 mg e 0,093 mg, respectivamente. Por meio desses resultados é possível indicar que o hidrocondicionamento, independentemente do nível de déficit hídrico, assim como o déficit hídrico no potencial -0,1 MPa sem a aplicação do atenuador, promoveram maior acúmulo de biomassa radicular. Por outro lado, foi possível verificar que a combinação entre o déficit hídrico mais severo e o ácido giberélico podem ser prejudiciais a formação de raízes.

Os resultados revelam que a MSPA foi favorecida pelos tratamentos com déficit hídrico mais leve (-0,1 MPa), principalmente quando associados ao hidrocondicionamento e ao ácido giberélico, assemelhando-se ao comportamento verificado para o CPA. No entanto, a menor massa seca foi constatada no tratamento -0,2 MPa + AG₃, indicando que o efeito do pré-condicionamento pode ser limitado sob estresse mais severo. Para a MSR, os melhores resultados foram verificados nos tratamentos com hidrocondicionamento, não diferindo entre os potenciais, enquanto o tratamento com o ácido giberélico no potencial -0,2 MPa obteve menor acúmulo. Com estes resultados, pode-se inferir que na catingueira, o hidrocondicionamento contribui para o crescimento radicular, mesmo sob condições adversas, ao passo que o ácido giberélico isolado pode comprometer a alocação de biomassa para as raízes em condições de maior estresse.

Os resultados obtidos por Costa *et al.* (2021) corroboram com os verificados nesta pesquisa, ao evidenciar que os tratamentos com a utilização do hidrocondicionamento e ácido giberélico promoveram aumento da massa seca total das mudas de *Salvia hispanica* L., com

incremento total entre os potenciais de 0,0 e -0,4 MPa de 60% e 58%, respectivamente. O ácido giberélico tem a capacidade de reduzir o potencial hídrico celular, e dessa forma facilitar a entrada de água e melhorar a tolerância ao déficit hídrico por meio da hidrólise do amido em açúcares, além de aumentar a elasticidade da parede celular (Miri *et al.*, 2021).

Conforme a análise variância, constatou-se efeito significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) para açúcares solúveis totais, aminoácidos livres totais e prolina livre (Tabela 2).

Tabela 2: Resumo da análise de variância para açúcares solúveis totais (AST), aminoácidos livres totais (ALT) e prolina livre (PL) em plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis sob déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.

Fontes de variação	Quadrado médio			
		AST	ALT	PL
	GL	(mg/g MF)	(μ mol/g MF)	
Tratamento	8	780366,33**	3,96**	69,60**
Erro	18			
CV		21,50	21,20	8,81
Médias		2024,71	4,37	9,71

*Valores significativos à 5% de probabilidade. ** Valores significativo à 1% de probabilidade. ^{ns} não-significativo. CV – coeficiente de variação.

As plantas desenvolveram estratégias ao longo do processo evolutivo para poder conseguir se adaptar as condições estressantes do ambiente, incluindo a osmorregulação, eliminação de espécies reativas de oxigênio (EROs), respostas fotossintéticas, regulação de fitohormônios, e captação, exclusão e compartimentação de íons. (Lee *et al.*, 2013; Yin *et al.*, 2024). O aumento do déficit hídrico, fez com que a espécie buscasse por mecanismos de osmorregulação como forma de proteção para mitigar os efeitos do déficit hídrico mantendo o equilíbrio osmótico, com a acumulação de osmólitos como açúcares solúveis, prolina e aminoácidos (Silva *et al.*, 2019).

Na concentração de açúcares solúveis totais (AST), verificou-se menor média para o tratamento controle com 817,49 mg/g massa fresca (Figura 4A). Nos tratamentos sob déficit hídrico com ou sem atenuadores, constatou-se médias mais elevadas de açúcares solúveis, sendo o tratamento -0,1 MPa + AS o que promoveu maior acúmulo (2549,13 mg/g de massa fresca), embora estatisticamente semelhante a outros tratamentos de estresse e atenuadores. Estes resultados implicam que o déficit hídrico, independente da aplicação de atenuadores, promoveu o acúmulo de açúcares, que por sua vez podem atuar como osmólitos e fonte de energia e contribuir para a tolerância da espécie ao estresse.

O trabalho desenvolvido por Zafar *et al.* (2021) revelou que realizar aplicação foliar de ácido salicílico em mangue-de-botão (*Conocarpus erectus* L.) e choupo-oriental (*Populus deltoides* L.) elevou os teores de açúcares solúveis durante o déficit hídrico, atuando em sinergia com prolina e compostos fenólicos na proteção contra danos celulares. Além disso, a interação entre ácido salicílico e ácido abscísico sob seca precoce promoveu acúmulo de hexoses e sacarose em colza (*Brassica napus*), reforçando o ajuste osmótico mediado por vias hormonais (Park *et al.*, 2021). As sementes submetidas ao hidrocondicionamento também apresentaram aumento nas concentrações de AST, refletindo em melhores desempenhos nas variáveis, germinação, PCG, CPA, CR, MSPA e MSR.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, evidenciam que os atenuadores aplicados, principalmente o ácido salicílico e a técnica de hidrocondicionamento, favoreceram a degradação de reservas, promovendo a hidrólise do amido em açúcares solúveis. Esse acúmulo contribuiu para a tolerância ao déficit hídrico em catingueira e outras espécies.

A concentração de aminoácidos livres totais (ALT), foi significativamente influenciada pelos tratamentos (Figura 4B). Verificou-se menor concentração de aminoácidos no tratamento -0,1 MPa + H₂O com 2,112 µmol/g de massa fresca. Quando sob déficit hídrico mais elevado, constatou-se um maior acúmulo de aminoácido no tratamento -0,2 MPa + AS, não diferindo estatisticamente dos tratamentos apenas com o potencial de -0,2 MPa, -0,2 MPa + AG₃ e -0,1 MPa + AG₃ com acúmulos de 5,320, 4,921 e 4,773 µmol/g de massa fresca, respectivamente. Isso indica que o déficit hídrico tendeu a elevar a concentração de aminoácidos nas plântulas de catingueira, e alguns atenuadores em níveis mais altos de estresse podem impulsionar essa resposta.

Esses resultados refletem mecanismos adaptativos semelhantes em espécies sob déficit hídrico, nos quais reguladores como o ácido salicílico estimulam a síntese e o acúmulo de aminoácidos livres relacionados à osmorregulação e reparo celular. Carvalho *et al.* (2023) avaliaram tratamentos pré-germinativos em espécies de pitaya e verificaram o aumento do teor de ALT como forma de osmorregulação para mitigar os efeitos do estresse abiótico. No entanto, esse comportamento bioquímico não foi suficiente para mitigar os danos fisiológicos, pois foi verificado que as mudas oriundas do déficit hídrico a -0,2 MPa resultaram em baixos valores de germinação e vigor. O aumento do ALT em catingueira pôde confirmar o papel dos atenuadores, principalmente o ácido salicílico e o ácido giberélico, na ativação de mecanismos de ajuste osmótico e proteção enzimática, elevando o acúmulo de aminoácidos úteis ao equilíbrio celular sob déficit hídrico.

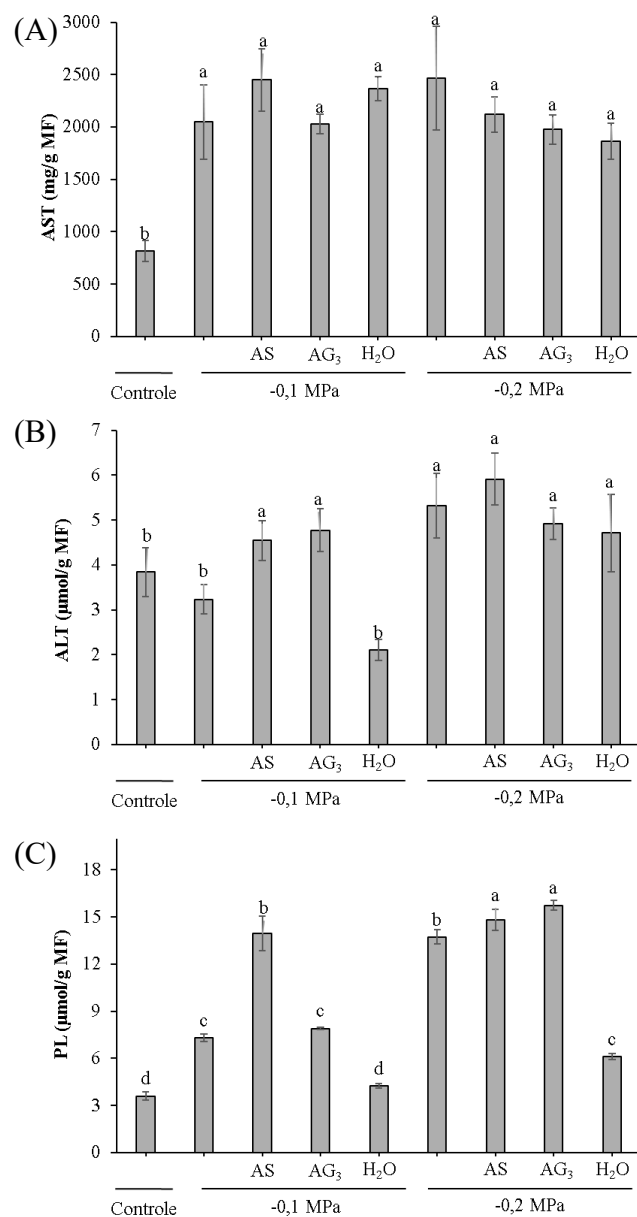


Figura 4: Açúcares solúveis totais (A), aminoácidos livres totais (B) e prolina livre (C) de plântulas de *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis submetidas ao déficit hídrico e utilização de atenuadores. Mossoró-RN, 2025.

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Skott Knott a 5% de probabilidade.

A prolina livre (PL) demonstrou-se altamente responsiva aos tratamentos com efeitos significativos (Figura 4C). O tratamento controle exibiu menor concentração de prolina com média de 3,60 $\mu\text{mol/g}$ de massa fresca. No entanto, todos os tratamentos sob déficit hídrico, com ou sem atenuadores, resultaram em incremento no acúmulo de prolina. O tratamento -0,2 MPa + AG₃ foi o que mais induziu o acúmulo de prolina com 15,74 $\mu\text{mol/g}$ de massa fresca, com incremento de 14,73% em relação ao potencial -0,2 MPa, não diferindo estatisticamente

entre si. Quando sob potencial reduzido de -0,1 MPa, o incremento foi maior no tratamento com ácido salicílico, cujo aumento foi de 91,35%. Este aumento elevado na concentração de prolina reforça sua função fundamental como osmólito e protetor celular na espécie florestal estudada sob condições de déficit hídrico, indicando a ativação eficiente dos mecanismos de defesa bioquímica.

A prolina atua como um importante osmólito celular, contribuindo para a manutenção da turgidez e do equilíbrio redox durante estresses abióticos. Em sua forma livre, auxilia no controle da desidratação celular, estabiliza estruturas subcelulares, neutraliza radicais livres e reduz o potencial redox (Lehmann *et al.*, 2010; Mushtao *et al.*, 2024). Além disso, estudos indicam que reguladores como ácido salicílico e ácido giberélico induzem enzimas envolvidas na biossíntese de prolina, aumentando seu acúmulo em condições adversas (Kijowska-Oberc; Dylewski; Ratajczak, 2023).

4. CONCLUSÕES

O déficit hídrico nos tratamentos empregados não comprometeu a germinação de *C. pyramidale*, porém reduz o vigor, no entanto este foi melhorado pelo hidrocondicionamento e pela aplicação de ácido giberélico.

A utilização de atenuadores favoreceu o acúmulo de açúcares solúveis totais, aminoácidos livres totais e prolina livre, indicando ativação de mecanismos osmoprotetores.

O ácido salicílico promoveu melhor desempenho geral, destacando-se pela ativação mais eficiente de mecanismos bioquímicos.

Apesar dos resultados promissores, são necessários estudos adicionais com diferentes concentrações e combinações de atenuadores, visando otimizar a eficácia e ampliar a aplicabilidade em condições diversas de estresse.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, R. A. et al. Response of antioxidant enzymes to transfer from elevated carbon dioxide to air and ozone fumigation, in the leaves and roots of wild-type and a catalase- deficient mutant of barley. **Physiologia Plantarum**, v. 104, n. 2, p. 280–292, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040217.x>
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. Rapid determination of free proline for water stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, n. 1, p. 205-207, 1973. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00018060>. Acesso em: [03 de junho de 2025]
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, v.72, p.248-259, 1976. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)
- BRAUN, H. et al. Germinação in vitro de sementes de beterraba tratadas com ácido giberélico em diferentes concentrações de sacarose no meio de cultura. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 3, p. 539-545, 2010. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744097002.pdf>. Acesso em: [26 de junho de 2025]
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras Para Análise De Sementes**. Brasília: MAPA, p.309. 2009.
- CARVALHO, S. M. C. et al. Tratamentos pré-germinativos em sementes de pitaya (*Hylocereus spp.*) para atenuação do estresse hídrico. **Revista Caatinga**, v. 36, n. 1, p. 80-86, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252023v36n109rc>
- COSTA, A. A. et al. Osmoproteção em sementes de *Salvia hispanica* L. sob atenuadores do estresse hídrico. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e233547, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.233547>
- DRUMOND, M. A et al. Sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) como alternativa para diversificação de renda no Semiárido brasileiro. Cap. 30, p. 1057-1064, 2021.
- FERREIRA, T. C. et al. Promoção em vigor e germinação em sementes da caatinga pela utilização de técnicas de priming. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 7, n. 1, p. 37-45, 2022. DOI: [dx.doi.org/10.5380/biofix.v7i1.81424](https://doi.org/10.5380/biofix.v7i1.81424)
- FERREIRA, D. F. SISVAR: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Brazilian Journal of Biometrics**, v. 37, n. 4, p. 529-535, 2019.
- GIANOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v.59, n. 2, p.309-314, 1977. DOI: <http://dx.org/10.1104/pp.59.2.309>
- GUO, L. et al. Integrated physiological, biochemical and transcriptomic analyses reveal the mechanism of salt tolerance induced by a *halotolerant Serratia* sp. NTN6 in maize. **Environmental and Experimental Botany**, v. 221, p. 105724, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105724>

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987. DOI: <https://dx.org/10.1104/pp.84.2.450>

KHAN, M. N. et al. Seed priming with melatonin coping drought stress in rapeseed by regulating reactive oxygen species detoxification: Antioxidant defense system, osmotic adjustment, stomatal traits and chloroplast ultrastructure perseveration. **Industrial Crops and Products**, v. 140, p. 111597, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111597>

KIJOWSKA-OBERC, J.; DYLEWSKI, Ł.; RATAJCZAK, E. Proline concentrations in seedlings of woody plants change with drought stress duration and are mediated by seed characteristics: a meta-analysis. **Scientific Reports**, v. 13, n. 1, p. 15157, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40694-5>

LEAL, C. C. P. et al. Estresse hídrico na germinação e vigor de sementes de mofumbo (*Combretum leprosum* Mart.) em diferentes temperaturas. **Revista Ciência Agronômica**, v. 51, n. 1, p. e20186357, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200013>

LEE, M. H. et al. Divergences in morphological changes and antioxidant responses in salt-tolerant and salt-sensitive rice seedlings after salt stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 70, p. 325-335, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.05.047>

LEHMANN, S. et al. Proline metabolism and transport in plant development. **Amino acids**, v. 39, p. 949-962, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00726-010-0525-3>

MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Estados Unidos, v. 2, n. 2, p. 176-77, 1962.

MAIA, G. N. Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades. **Fortaleza: Print color**, p. 413, 2012.

MARCOS-FILHO J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2 ed. Londrina(PR): ABRATES, 2015. 660 p.

MATIAS, J. R. et al. Germination of *Cenostigma pyramidale* seeds under different temperatures and salinities. **Informativo ABRATES**, v. 28, n. 1, p. 115-118, 2018. Disponível em: https://www.abrates.org.br/img/informations/50b2d428-6d43-4b83-820b3bbf1d331f3a_IA_v28n1-Workshop_final.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2025.

MIRI, M. et al. Ameliorative effects of foliar spray of glycine betaine and gibberellic acid on cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) yield affected by drought stress. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07228-7>

MUSHTAQ, N. U. et al. Crosstalk in proline biosynthesis regulates proline augmentation and resilience to salt stress in *Panicum miliaceum* L. **Environmental and Experimental Botany**, v. 224, p. 105810, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2024.105810>

NAKANO, Y.; ASADA, K.: Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate specific peroxidase in spinach chloroplast. **Plant and Cell Physiology**, v.22, n.5, p.867-880, 1981. DOI: <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>

NÓBREGA, J. S. et al. Ácido salicílico atenua o efeito do estresse hídrico na germinação e crescimento inicial de plântulas de *Cereus jamacaru* DC. **Scientia Plena**, v. 17, n. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2021.040204>

NÓBREGA, J. S. et al. Osmocondicionamento de sementes com ácido salicílico na indução de tolerância de *Cenostigma pyramidale* ao déficit hídrico. **Revista Árvore**, v. 48, p. e4802, 2024. DOI: <https://doi.org/10.53661/1806-9088202448263630>

NÓBREGA, J. S. et al. Physiological response of seeds of *Crotalaria spectabilis* under drought and heat stress. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 65, p. e22220145, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2022220145>

NÓBREGA, J. S. et al. Seed quality and vigor of germination of *Moringa oleifera* Lam. in saline stress. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, p. e21210106, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2021210106>.

OLIVEIRA, V. N. S. et al. Tolerance and pre-germinative treatments in jucá seeds (*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz var. *ferrea*) submitted to salinity. **International Journal of Development Research**, v. 11, p. 49692-49698, 2021. DOI: <https://doi.org/10.37118/ijdr.22671.08.2021>

PARK, S. et al. Drought intensity-responsive salicylic acid and abscisic acid crosstalk with the sugar signaling and metabolic pathway in *Brassica napus*. **Plants**, v. 10, n. 3, p. 610, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10030610>

RAMALHO, L. B. et al. Hidrocondicionamento de sementes de *Piptadenia moniliformis* Benth. e seus efeitos sobre a tolerância ao estresse salino. **Ciência Florestal**, v. 30, p. 221-230, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509829998>

REFLORA, 2024. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/herbarioVirtual/ConsultaPublicoHVUC/ConsultaPublicoHVUC.do?idTestemunho=5914275>. Acesso em: 14 de maio de 2025

RYU, H.; CHO, Y. Plant hormones in salt stress tolerance. **Journal of Plant Biology**, v. 58, p. 147-155, 2015. DOI: 10.1007/s12374-015-0103-z

SANTOS, F. A.; JÚNIOR, J. L. S.; SILVA, E. C. A hidratação descontínua beneficia a germinação de sementes e confere maior tolerância à seca em mudas de *Sesbania virgata* (Cav.) Pers.?. **Revista Semiárido De Visu**, v. 12, n. 3, 2024. DOI: <https://doi.org/10.31416/rsdv.v12i3.529>

SILVA, J. E. S. B. D. A. et al. Salicylic acid in the physiological priming of onion seeds subjected to water and salt stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 919-924, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n12p919-924>

SOUSA, A. C. M. et al. Aplicação de doses de ácido giberélico (ga3) como tratamento pré-germinativo em sementes de *Hymenaea Courbaril*. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 93-99, 2021. DOI: <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.008.0009>

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=PpO4DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=TAIZ,+L.+et+al.+Fisiologia+e+desenvolvimento+vegetal.+6.+ed.+Porto+Alegre,+R+S:+Artmed,+2017.+858+p.&ots=7SFhpXDSSe&sig=98hCl9opFHgOU7_XtR2d4VO9Lfw#v=onepage&q&f=false. Acesso em: [26 de junho de 2025]

VILLELA, F. A.; DONI FILHO, L.; SEQUEIRA, E. L. Tabela de potencial osmótico em função da concentração de polietileno glicol 6000 e da temperatura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 11, p. 1957-1968, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab1991.v26.3549>

YEMM, E. W.; WILLIS, A. J. The estimation of carbohydrates in plants extracts by anthrone. **Biochemical Journal**, v. 57, n.3, p. 508-514, 1954. DOI: <https://doi.org/10.1042/bj0570508>

YIN, D. et al. Effects of salinity on salt tolerance of *Limonium bicolor*, a salt-secretion halophyte in the coastal areas around Bohai Sea of China. **Russian Journal of Plant Physiology**, v. 71, n. 4, p. 153, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1021443724606621>

ZAFAR, Z. et al. Foliar application of salicylic acid improves water stress tolerance in *Conocarpus erectus* L. and *Populus deltoides* L. saplings: Evidence from morphological, physiological, and biochemical changes. **Plants**, v. 10, n. 6, p. 1242, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10061242>