



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**



TESE

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

PATRÍCIA DA SILVA COSTA

***SEED PRIMING* COM MATERIAL VEGETAL, RESÍDUO VÍTREO E LUZ NA
FORMAÇÃO DE MUDAS DE *Moringa oleifera* SOB ESTRESSES TÉRMICO E
HÍDRICO**

**CAMPINA GRANDE - PB
AGOSTO DE 2022**

PATRÍCIA DA SILVA COSTA

Lic. em Ciências Agrárias e M.Sc. em Zootecnia

***SEED PRIMING* COM MATERIAL VEGETAL, RESÍDUO VÍTREO E LUZ NA
FORMAÇÃO DE MUDAS DE *Moringa oleifera* SOB ESTRESSES TÉRMICO E
HÍDRICO**

Orientador: Profº. D.Sc. José Dantas Neto - UAEEA/CTRN/UFCG

Orientador: Profº. D.Sc. Rener Luciano de Souza Ferraz - UATEC/CDSA/UFCG

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

CAMPINA GRANDE - PB

AGOSTO DE 2022

C837s

Costa, Patrícia da Silva.

Seed priming com material vegetal, resíduo vítreo e luz na formação de mudas de *Moringa oleifera* sob estresses térmico e hídrico / Patrícia da Silva Costa. – Campina Grande, 2022.

57 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2022.

"Orientação: Prof. Dr. José Dantas Neto, Prof. Dr. Rener Luciano de Souza Ferraz".

Referências.

1. Irrigação e Drenagem. 2. *Moringaceae*. 3. *Cyperus rotundus*.
4. Resíduos Vítreos. 5. Silício. 6. Qualidade de Luz. 7. Estresses Abióticos I. Dantas Neto, José. II. Ferraz, Rener Luciano de Souza. III. Título.

CDU 631.62/.67(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

PATRÍCIA DA SILVA COSTA

SEED PRIMING COM MATERIAL VEGETAL,
RESÍDUO VÍTREO E LUZ NA FORMAÇÃO DE
MUDAS DE Moringa oleifera SOB ESTRESSES
TÉRMICO E HÍDRICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola como
pré-requisito para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 31/08/2022

Jose Dantas Neto - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Renner Luciano de Souza Ferraz - Orientador(a) - UATEC/CDSA/UFCG

Carlos Alberto Vieira de Azevedo - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Vera Lucia Antunes de Lima - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFCG

Alberto Soares de Melo - Examinador(a) Externo(a) - PPGCA/PRPGP/UEPB

Ivomberg Dourado Magalhães - Examinador(a) Externo(a) - DA/CECA/UFAL

Ashwell Rungano Ndhlala - Examinador(a) Externo(a) - GBRCE/SAES/UL



Documento assinado eletronicamente por **RENER LUCIANO DE SOUZA FERRAZ, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR-VISITANTE**, em 15/09/2022, às 12:31, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alberto Soares de Melo, Usuário Externo**, em 15/09/2022, às 12:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE DANTAS NETO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/09/2022, às 13:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/09/2022, às 23:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ivomberg Dourado Magalhães, Usuário Externo**, em 28/09/2022, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **CARLOS ALBERTO VIEIRA DE AZEVEDO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 29/09/2022, às 14:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **2730409** e o código CRC **C594A0C9**.

DEDICATÓRIA

Aos meus avós Benedita Ana, Sebastião da Costa e Manoel Teodosio,
In memoriam, e Maria Eterna, ao meu pai Odaci Costa,
à minha mãe Antonia Teodosio, aos meus irmãos
Flávio Costa e Daniele Costa, ao meu filho
Bruno Costa, à minha sobrinha Julia
Costa e demais familiares

Dedico

Aos mestres que contribuíram direta ou indiretamente para minha
formação acadêmica e profissional, José Dantas Neto,
Rener Luciano de Souza Ferraz e
Alberto Soares de Melo

Ofereço

EPÍGRAFE

Somos como plantas, a falta ou o excesso nos prejudicam, precisamos ser regados e nutridos de coisas boas, e quando submetidos aos estresses, devemos desenvolver mecanismos e sermos tolerantes para que possamos superar, tudo é questão de equilíbrio.

Patrícia da Silva Costa

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ser essencial em minha vida e por guiar meu caminho e entregar meu destino nas mãos de pessoas tão especiais.

Aos meus pais Odaci Costa e Antonia Teodosio, por todo amor, amizade, companheirismo, compreensão, ensinamentos e incentivos para que a cada dia eu possa ser uma pessoa melhor. Agradeço pelo esforço e comprometimento em cuidar do meu filho com tanto amor para que eu pudesse conquistar mais essa vitória. Vocês sempre priorizaram a educação dos filhos e hoje colho os frutos do meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu filho Bruno Costa, o dono do amor mais puro e grandioso que existe em mim, que sempre me deu forças com seu amor, carinho, e mesmo sendo tão pequeno teve que entender e se acostumar com minha ausência física. Você me motiva a ser melhor a cada dia em tudo que eu faço, você me faz sentir capaz de enfrentar qualquer obstáculo.

Aos meus irmãos Daniele Costa e Flávio Costa, pelo companheirismo, amizade e amor que nos unem, por estarem sempre ao meu lado e contribuírem com seus ensinamentos, conhecimentos, palavras de força e ajuda. E à minha sobrinha Julia Costa, minha filha do coração, por sempre estar ao meu lado me motivando com seu amor e amizade. Você é especial em minha vida, me orgulho de ser sua tia.

À minha tia Adaci Nunes, *In memoriam*, e ao meu tio Ermando Costa, *In memoriam*, que me apoiaram e torceram para que eu concluísse o doutorado, mas, infelizmente, não puderam estar comigo fisicamente nesse momento.

Aos meus primos e amigos Liliane Soares, Vitória Caroline, Caio Sousa e Rayane Lima, pelas palavras de encorajamento e carinho.

Aos meus cunhados Mellissa Sobrinho, Edijailson Almeida e Ronierison Maciel, pela amizade, companheirismo, incentivos e parcerias.

Ao meu sogro Sebastião de Souza, pelo carinho com que me recebeu em Campina Grande, pelos cuidados comigo e pelo apoio.

Às minhas amigas Newcélia Barreto e Amanda Alves, pela amizade, apoio e incentivo.

Aos meus orientadores José Dantas Neto e Rener Luciano de Souza Ferraz, pela confiança e amizade depositada, por terem acreditado em meu potencial e por me inspirarem, ajudarem, desafiarem e me encorajarem a ser cada dia melhor.

À minha colega de curso e amiga Luana Veloso, pelos cuidados, companheirismo, carinho e incentivos, e aos demais colegas.

Aos integrantes do Laboratório de Ecofisiologia de Plantas Cultivadas, Rayanne Alencar, Priscylla Marques, Yngrid Araujo, Lucyelly Borborema, Semako Ibrahim, Yuri Lima, Deibson Costa, Guilherme Dias, Igor Cavalcante, João Pereira, Bianca Silva e José Mateus Lira, sob a coordenação do professor Alberto Soares de Melo, agradeço toda atenção, carinho, ensinamentos e ajuda durante a realização do experimento e das análises, e por se tornarem grandes amigos.

Ao professor Alberto Melo, pelos ensinamentos, incentivo e pela oportunidade de trabalhar em seu grupo de pesquisa.

À equipe do Horto Florestal, em nome de Beto, pelo apoio durante a realização do experimento.

À Vivineide Martins, pela amizade, apoio e ajuda durante a realização do experimento.

Ao professor Ricardo Schneider, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pela parceria e fornecimento do material vítreo utilizado no experimento.

Aos professores Pedro Roberto Almeida Viégas, da Universidade Federal de Sergipe, e Ashwell Rungano Ndhkala, da University of Limpopo, pela parceria nas publicações juntamente com nosso grupo de pesquisa.

Aos professores Ivomberg Magalhães, Aldair Medeiros e Erivando Bezerra, pela parceria.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em especial aos professores Carlos Azevedo, Vera Lima e Ronaldo do Nascimento, pelos ensinamentos e incentivos durante as aulas, acolhida e confiança.

À equipe da coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nome da professora Josivanda Gomes e Roberto Roman, pelo apoio durante o curso.

À equipe do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, *Campus* de Sumé, em nome dos professores Hugo Alcântara e Tiago Araújo, pela recepção, apoio e parcerias.

À Universidade Federal de Campina Grande e Universidade Estadual da Paraíba, *Campus* de Campina Grande, por terem oportunizado meu aperfeiçoamento enquanto profissional das Ciências Agrárias.

Enfim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho e formação de recurso pessoal para a sociedade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pelo financiamento deste trabalho no âmbito do Projeto de Pesquisa nº 160862/2019-1.

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

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo geral	10
2.2. Objetivos específicos.....	11
3. REVISÃO DE LITERATURA	11
3.1. A <i>Moringa oleifera</i> Lamarck	11
3.1.1. Origem, descrição e distribuição geográfica	11
3.1.2. Usos, aplicações e importância socioeconômica e ambiental	12
3.2. Estresses abióticos	13
3.3. <i>Seed priming</i> , modulação de crescimento e indução de tolerância aos estresses	14
4. MATERIAL E MÉTODOS	16
4.1. Experimento I: <i>Seed priming</i> com qualidade de luz e extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	16
4.1.1. Localização experimental.....	16
4.1.2. Delineamento experimental	17
4.1.3. Condições de qualidade de luz.....	17
4.1.4. Preparação de extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	17
4.1.5. Aplicação do <i>seed priming</i>	18
4.1.6. Semeadura	19
4.1.7. Variáveis avaliadas	20
4.2. Experimento II: <i>Seed priming</i> com resíduos vítreos microparticulados como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha	23
4.2.1. Localização experimental.....	23
4.2.2. Delineamento experimental	23
4.2.3. Aplicação do <i>seed priming</i>	24
4.2.4. Formação de mudas e imposição de variações de temperatura e reposição de água no solo	25
4.2.5. Variáveis avaliadas	26
4.3. Análise estatística	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1. Experimento I: <i>Seed priming</i> com qualidade de luz e extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	30
5.1.1. Resultados.....	30
5.1.2. Discussão.....	37
5.2. Experimento II: <i>Seed priming</i> com resíduos vítreos microparticulados como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha	38
5.2.1. Resultados.....	38
5.2.2. Discussão.....	45
6. CONCLUSÕES	48
LITERATURA CITADA	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Coleta (A), pesagem (B) e preparo (C e D) do extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	18
Figura 2. Acondicionamento das caixas Gerbox [®] contendo os tratamentos na câmara de germinação <i>Biochemical Oxygen Demand</i>	19
Figura 3. Semeadura (A) e manejo de irrigação (B) das plântulas de <i>Moringa oleifera</i>	20
Figura 4. Avaliações de crescimento das plântulas de <i>Moringa oleifera</i>	21
Figura 5. Pesagem das micropartículas de vidro (A), embebição das sementes na solução (B) e acondicionamento em câmara de germinação <i>Biochemical Oxygen Demand</i> (C).	25
Figura 6. Formação das mudas de <i>Moringa oleifera</i> (A e B), condicionamento em câmara de crescimento Fitotron (C e D) e manejo de irrigação (E e F).	26
Figura 7. Avaliação das trocas gasosas (A e B), status hídrico (C) e análises bioquímicas (D, E, F, G e H).	26
Figura 8. Projeção bidimensional dos escores fatoriais (A e C) e das variáveis (B e D) nos quatro primeiros componentes principais (CPs 1, 2, 3 e 4) da interação entre níveis de radiação do espectro luminoso e concentrações de extrato aquoso tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	32
Figura 9. Dendrogramas de agrupamento dos <i>seed priming</i> construídos com as variáveis do CP ₁ (A), CP ₂ (B), CP ₃ (C) e CP ₄ (D) em função da interação entre níveis de radiação do espectro luminoso e concentrações de extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	34
Figura 10. Tempo médio de emergência (A), comprimento médio final da parte aérea (B) e fitomassa final da raiz (C) de plântulas de <i>Moringa oleifera</i> em função da interação entre níveis de radiação do espectro luminoso e concentrações de extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	35
Figura 11. Projeção bidimensional de escores fatoriais (A e C) e variáveis (B e D) nos quatro primeiros componentes de interação principais (CPs 1, 2, 3 e 4) entre níveis de reposição de água no solo (W50 e W100) e variações de temperatura (T30° e T40°) em <i>Moringa oleifera</i>	41
Figura 12. Vazamento de eletrólitos intracelulares (A), açúcares solúveis totais na raiz (B) e superóxido dismutase na raiz (C) em função da reposição de água no solo e variações de temperatura em <i>Moringa oleifera</i> . Médias seguidas de letras iguais minúsculas para <i>seed priming</i> , maiúsculas para reposição de água no solo e gregas para variações de temperatura não diferem ($p > 0,05$) pelo teste t de Student.	42
Figura 13. Mudas de <i>Moringa oleifera</i> submetidas ao <i>seed priming</i> , reposição de água no solo e variações de temperatura.	44
Figura 14. Efeito do <i>seed priming</i> com micropartículas de silício sob irradiação com luz vermelha em mudas de <i>Moringa oleifera</i> submetidas aos estresses térmico e hídrico.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Correlação entre variáveis originais e componentes principais, autovalores, variância explicada e acumulada e probabilidade de significância do teste de hipótese.....	31
Tabela 2. Médias das variáveis avaliadas em função da interação entre qualidade de luz e concentrações de extrato aquoso de tubérculos de <i>Cyperus rotundus</i>	36
Tabela 3. Correlação entre variáveis originais e componentes principais, autovalores, variância explicada e acumulada e significância de probabilidade do teste de hipótese na interação dos três primeiros componentes principais (CPs 1, 2 e 3) entre o <i>seed priming</i> , níveis de reposição de água no solo e variações de temperatura em mudas de <i>Moringa oleifera</i>	39
Tabela 4. Médias dos escores dos fatores para cada componente e médias \pm erro padrão das variáveis originais avaliadas em função da interação entre <i>seed priming</i> , níveis de reposição de água no solo e variações de temperatura em mudas de <i>Moringa oleifera</i>	44

COSTA, Patrícia da Silva. *Seed priming com material vegetal, resíduo vítreo e luz na formação de mudas de Moringa oleifera sob estresses térmico e hídrico*. 2022. 57 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

RESUMO

O aumento populacional associado à exploração de recursos naturais e às mudanças climáticas influencia a demanda por alimentos, sobretudo em regiões semiáridas, o que evidencia a necessidade de tecnologias para melhor crescimento e adaptação das espécies cultivadas aos agroecossistemas. Adicionalmente o desenvolvimento de metodologias de cultivo que utilizam extratos vegetais e materiais de fontes residuárias são desejáveis para o desenvolvimento sustentável. Neste sentido, objetivou-se avaliar se o *seed priming* modula a germinação e o crescimento inicial e induz tolerância aos estresses térmico e hídrico em *Moringa oleifera*. Para avaliar a germinação e crescimento inicial de plântulas, foi conduzido experimento em laboratório e em ambiente telado, em delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 4 x 4, composto por quatro condições de qualidade de luz - QLU (branca, azul, vermelha e vermelho distante) e quatro concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus* - EAC (0, 25, 50 e 100%). Para avaliar a indução de tolerância aos estresses térmico e hídrico em mudas, foi conduzido experimento em laboratório e em câmara de crescimento tipo Fitotron, em delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial 2 x 2 x 2, composto por *seed priming* (NSP - sem aplicação de *seed priming* e SPSi - *seed priming* com micropartículas de vidro como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha), reposição de água no solo (W50 - 50% e W100 - 100% da evapotranspiração da cultura - ETc) e variações de temperatura (T30° - 30 °C dia/25 °C noite e T40° - 40 °C dia/35 °C noite). O *seed priming* com luz vermelha reduziu o tempo médio de emergência, enquanto as luzes azul, vermelha e vermelho distante associadas a 50% de EAC aumentou o comprimento inicial da parte aérea e acúmulo de pigmento fotossintético. O *seed priming* com luz azul resultou em plântulas com comprimento final de plântulas menor, no entanto, a aplicação de 100% de EAC reverteu isso. A luz branca em combinação com concentrações de 50 e 100% de EAC promoveu maior taxa de crescimento relativo da parte aérea das plântulas. A pesquisa revelou que o *seed priming* com QLU e EAC modula a germinação e o crescimento inicial de plântulas de *M. oleifera*. O *seed priming* com micropartículas de vidro como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha atenuou os efeitos dos estresses térmico e hídrico em mudas de *M. oleifera* através da homeostase das trocas gasosas, status hídrico foliar, ajustamento osmótico e mecanismo antioxidante.

Palavras-chave: Moringaceae, *Cyperus rotundus*, resíduos vítreos, silício, qualidade de luz, estresses abióticos.

COSTA, Patrícia da Silva. **Seed priming with plant material, vitreous residue and light in the formation of *Moringa oleifera* seedlings under heat and water stress.** 2022. 57 f. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2022.

ABSTRACT

Population growth associated with the exploitation of natural resources and climate change influences the demand for food, especially in semi-arid regions, which highlights the need for technologies for better growth and adaptation of cultivated species to agroecosystems. Additionally, the development of cultivation methodologies that use plant extracts and materials from waste sources are desirable for sustainable development. In this sense, the objective was to evaluate whether seed priming modulates germination and initial growth and induces tolerance to heat and water stress in *Moringa oleifera*. To evaluate the germination and initial growth of seedlings, an experiment was carried out in the laboratory and in a screened environment, in a completely randomized design in a 4 x 4 factorial scheme, consisting of four conditions of light quality - QLU (white, blue, red and far red) and four concentrations of aqueous extract of tubers of *Cyperus rotundus* - EAC (0, 25, 50 and 100%). To evaluate the induction of tolerance to heat and water stress in seedlings, an experiment was carried out in the laboratory and in a Fitotron-type growth chamber, in a completely randomized design in a 2 x 2 x 2 factorial scheme, consisting of seed priming (NSP - without application of seed priming and SPSi - seed priming with glass microparticles as a source of silicon under irradiation with red light), soil water replacement (W50 - 50% and W100 - 100% of crop evapotranspiration - ETc) and temperature variations (T30 ° - 30 °C day/25 °C night and T40 ° - 40 °C day/35 °C night). Seed priming with red light reduced the mean emergence time, while blue, red and far red lights associated with 50% EAC increased the initial shoot length and photosynthetic pigment accumulation. Seed priming with blue light resulted in seedlings with a shorter final seedling length, however, the application of 100% EAC reversed this. White light in combination with concentrations of 50 and 100% of EAC promoted a higher relative growth rate of the aerial part of the seedlings. The research revealed that seed priming with QLU and EAC modulates the germination and initial growth of *M. oleifera* seedlings. Seed priming with glass microparticles as a source of silicon under red light irradiation attenuated the effects of heat and water stress in *M. oleifera* seedlings through gas exchange homeostasis, leaf water status, osmotic adjustment and antioxidant mechanism.

Keywords: Moringaceae, *Cyperus rotundus*, glassy residues, silicon, light quality, abiotic stresses.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento da população mundial impulsiona o setor agropecuário para aumentar a produção de alimentos e garantir a segurança alimentar, principalmente porque o número de pessoas subnutridas cresceu de 83 para 132 milhões em 2020. Esse aumento de produção precisa ocorrer com menor impacto possível aos recursos naturais para atender um dos objetivos prioritários da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável (CALONE *et al.*, 2022). Uma alternativa para aumentar a produção de alimentos e reduzir os impactos da agricultura aos agroecossistemas é o cultivo de plantas que tenham potencial para múltiplas possibilidades de uso e que apresentem plasticidade genotípica e fenotípica para adaptação a diferentes ambientes de cultivo (COSTA *et al.*, 2024).

Nesse cenário, a *Moringa oleifera* Lamarck, uma espécie da família Moringaceae, nativa da Índia e Paquistão (DOMENICO *et al.*, 2019), pode ser uma alternativa para cultivo com finalidade alimentícia, medicinal, industrial, ambiental e social, pois, é uma fonte abundante de aminoácidos essenciais, macronutrientes e micronutrientes, possui atividade antifúngica, analgésica, anti-inflamatória, antioxidante, antidiabética, antitumoral e antibacteriana, elevado teor de óleo nas sementes, além disso pode ser usada para purificação de água e geração de renda e melhoria da qualidade de vida dos produtores ao redor do mundo (GARCIA *et al.*, 2019; KARTHICKEYAN, 2019; PÁRAMO-CALDERÓN *et al.*, 2019; MACÁRIO *et al.*, 2020; PARVEEN *et al.*, 2024).

Apesar do potencial adaptativo da *M. oleifera* aos agroecossistemas, seu crescimento, desenvolvimento e sua produção podem ser reduzidos quando a planta é exposta aos estresses térmico e hídrico (VASCONCELOS *et al.*, 2019; AZAM *et al.*, 2020; BOUMENJEL *et al.*, 2021; MOHAMMED *et al.*, 2021), principalmente em regiões semiáridas onde frequentemente ocorrem altos níveis de radiação solar, temperatura do ar elevada e restrição de água no solo, o que pode ser agravado pelas mudanças climáticas ambientais (BHADRA *et al.*, 2022; MELO *et al.*, 2022). O estresse térmico reduz a germinação de sementes e vigor de plântulas da *M. oleifera* (MUHL *et al.*, 2011; COSTA *et al.*, 2021) e aumenta o acúmulo de carboidratos não estruturais, aminoácidos e fenóis (MOHAMMED *et al.*, 2021). O déficit hídrico ativa o mecanismo antioxidante dessa espécie (AZAM *et al.*, 2020), a qual apresenta redução do tamanho dos estômatos, teor de pigmentos cloroplastídicos, das trocas gasosas foliares e do crescimento da raiz e da parte aérea (VASCONCELOS *et al.*, 2019; GALGAYE *et al.*, 2020; BOUMENJEL *et al.*, 2021).

Nesse contexto, torna-se necessário o uso de tecnologias para mitigação dos efeitos dos estresses abióticos sobre a *M. oleifera*. A técnica do *seed priming* é uma alternativa promissora (COSTA *et al.*, 2024), pois consiste na embebição das sementes em soluções com indutores de

crescimento e atenuadores de estresse, *e.g.*, extratos vegetais, pois possui menor custo e maior disponibilidade, como o extrato de tubérculos de *Cyperus rotundus* (Cyperaceae) (SANTOS *et al.*, 2021) que, devido a presença de elevadas concentrações de ácido-3-indolbutírico (AIB) e ácido indolacético (AIA), possui efeito indutor de crescimento, beneficia a germinação e melhora o enraizamento das plântulas (CAVALCANTE *et al.*, 2016; CAVALCANTE *et al.*, 2018).

Outra alternativa para atenuação dos estresses é o uso de resíduos vítreos na forma de pó microparticulado como fonte de silício (mais de 75% de SiO₂), uma vez que o Si atua na melhoria do crescimento das plantas, o que é atribuído à alteração nos mecanismos celulares e bioquímicos, bem como ao aumento da integridade da membrana e do sistema de defesa antioxidante sob várias condições de estresse abiótico (KHAN *et al.*, 2021). Além do Si, o vidro âmbar também possui outros elementos em sua composição, *e.g.*, Fe, S, Na, K, Ca e Al. Esse material é de fácil aquisição e de baixo custo, amplamente disponível em aterros sanitários e o processo para disponibilização dos nutrientes em sua composição é simples, pois requer unicamente a moagem e o peneiramento do resíduo vítreo.

É importante destacar que a eficiência desses indutores de germinação, crescimento e atenuadores de estresses abióticos pode ser otimizada a partir de estímulos ambientais de natureza física, como por exemplo, a qualidade da luz (fluência luminosa) irradiada (duração da fluência), uma vez que sementes e plantas possuem fotorreceptores responsivos à luz que desempenha papel crucial nos processos fisiológicos das plantas. A transdução de sinais luminosos envolve eventos bioquímicos importantes para a biossíntese e ação de fitormônios responsáveis pelas alterações fotomorfogênicas e tolerância a estresses abióticos (MATSUO *et al.*, 2019; POLESI *et al.*, 2019; VAISHAK *et al.*, 2019). Desta forma, considerando que as sementes da *M. oleifera* são responsivas à luz (COSTA *et al.*, 2021), a fluência luminosa irradiada durante o *seed priming* pode potencializar a ação do extrato de tubérculos de *C. rotundus* sobre a germinação e o crescimento e o efeito atenuador de estresses das micropartículas de resíduos vítreos em plantas dessa espécie.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar se o *seed priming* modula a germinação e o crescimento inicial e induz tolerância aos estresses térmico e hídrico em *Moringa oleifera*.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar se o *seed priming* com qualidade de luz e extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus* (tiririca) modulam a qualidade fisiológica de sementes, o crescimento e acúmulo de pigmentos cloroplastídicos em plântulas de *Moringa oleifera*.

Avaliar se o *seed priming* com resíduos vítreos microparticulados como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha atenua os efeitos dos estresses térmico e hídrico em mudas de *Moringa oleifera* cultivadas em câmara de crescimento tipo Fitotron.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. A *Moringa oleifera* Lamarck

3.1.1. Origem, descrição e distribuição geográfica

A *Moringa* (*Moringa oleifera* Lamarck) é universalmente conhecida como a planta milagrosa ou a árvore da vida, sendo estes adjetivos atribuídos com base em seus usos, particularmente no que diz respeito à medicina e nutrição. É um vegetal pertencente à família Moringaceae, nativa da Índia e amplamente cultivada nos trópicos em todo o globo terrestre, sendo introduzida no Brasil na década de 1950 como planta ornamental (RIVAS *et al.*, 2013). Possui crescimento rápido, sendo capaz de sobreviver em solos distróficos, demandando o mínimo de tratamentos culturais, e em longos períodos de seca, como é o caso do semiárido brasileiro (OYEYINKA & OYEYINKA, 2018).

É uma planta arbórea com longas vagens verdes, sementes aladas, folhas grandes e flores brancas perfumadas. Quanto ao porte, a *M. oleifera* é uma árvore de tamanho pequeno, com aproximadamente 10 a 12 m de altura. Em um ano, as árvores podem alcançar 4 m de altura, gerando flores e frutos, possibilitando múltiplas colheitas de sementes. As árvores de médio porte apresentam outras funções, como farmacêutica e melífera muito valorizada nos países onde existe este gênero. Na literatura existem relatos de que a cultura pode ser utilizada para fins medicinais, notadamente por suas propriedades anti-inflamatórias, antimicrobianas, antioxidantes e anticancerígenas. As raízes, por exemplo, são consideradas estimulantes e diuréticas, e os médicos de onde a planta é originária prescrevem a raiz nas febres intermitentes, epilepsia, histeria, paralisia, reumatismo, hipertrofias do fígado e do baço. Em condições favoráveis, uma única planta pode produzir de 50 a 70 kg de frutos por ano (SANTANA *et al.*, 2010; SOUTO & MAIOR JUNIOR, 2018).

3.1.2. Usos, aplicações e importância socioeconômica e ambiental

Quase todas as partes desta árvore são consideradas úteis. As folhas são usadas como forragem (BAKKE *et al.*, 2018), o caule e ramos na confecção de gomas, extração de néctar das flores e pó de sementes para purificação de água. A folha de *M. oleifera* tem sido usada como fonte alternativa de alimento para combater a desnutrição, especialmente entre crianças e bebês (OYEYINKA & OYEYINKA, 2018). Sabe-se que as folhas de *M. oleifera* contêm quantidades substanciais de vitamina A, C e E, quantidades expressivas de fenóis totais, proteínas, cálcio, potássio, magnésio, ferro, manganês e cobre (HEKMAT *et al.*, 2015), denotando o expressivo potencial nutricional da cultura para aplicações na alimentação humana e animal (VIEIRA *et al.*, 2018).

A planta de Moringa é rica em compostos bioativos, como óleos essenciais, saponinas e taninos, que estão presentes em diferentes partes da planta. Estes compostos têm frequentemente ação antimicrobiana e propriedades anti-helmínticas, que podem melhorar a utilização de alimentos pelos ruminantes e conseqüentemente o desempenho animal. Extratos fitogênicos e partes de plantas contendo esses compostos bioativos podem fornecer uma alternativa de baixo custo para melhorar a utilização de alimentos e o desempenho de fêmeas ruminantes em lactação (KHOLIF *et al.*, 2018), de modo que a cultura possui inúmeras aplicações na medicina popular e na indústria farmacêutica (PAIVA *et al.*, 2018; SERAFINI *et al.*, 2018).

Há uma busca crescente de polímeros naturais no tratamento de águas, um desses coagulantes naturais pode ser obtido na semente da árvore tropical *M. oleifera* (BERGAMASCO *et al.*, 2018). Em relação aos agentes químicos coagulantes/floculantes, o uso de Moringa apresenta grandes vantagens, como a biodegradabilidade, baixo índice de produção de lodo residual e baixa toxicidade (BAPTISTA *et al.*, 2017). As sementes de Moringa contêm proteínas coagulantes que podem ser facilmente extraídas em água e promovem a precipitação de partículas em suspensão, levando à diminuição na turbidez de água. Entre essas proteínas, pode-se destacar a lectina, que por suas atividades coagulante e antibacteriana, é um dos agentes que promovem purificação e descontaminação da água (VILLASEÑOR-BASULTO *et al.*, 2018).

É importante ressaltar que as sementes de Moringa podem conter entre 33 e 41% de óleo vegetal, sendo que mais 70% deste é constituído de ácido oleico e beénico (ácido docosanoico), o que torna o óleo de suas sementes uma alternativa bastante atrativa para a produção de biodiesel (KARTHICKEYAN, 2019). De fato, muitas pesquisas ao redor do mundo vêm abordando o óleo de *M. oleifera* para biodiesel (SILVA *et al.*, 2010), de modo que a cultura consiste em estratégia para o

cultivo em regiões áridas e semiáridas, sobretudo devido ao seu fácil manejo e adaptabilidade às condições edafoclimáticas do semiárido (DOMENICO *et al.*, 2019).

A inserção da Moringa na região semiárida do Brasil vem sendo alvo de pesquisas que objetivam contribuir para a sustentabilidade das atividades agrícolas na região, além da fixação e melhoria da qualidade de vida do homem no campo e até mesmo como ação mitigadora e de adaptação às mudanças climáticas pelos seus vários benefícios (SANT'ANNA *et al.*, 2018). De fato, pesquisadores vêm buscando a inserção da espécie no semiárido brasileiro como uma forma de transformação socioeconômica e ambiental, devido ao fato de constitui-se em uma cultura de múltiplos usos (SANTOS *et al.*, 2017; PEREIRA *et al.*, 2018).

3.2. Estresses abióticos

Os estresses causados por fatores abióticos consistem nas causas mais frequentes de redução do desempenho produtivo e rendimento das culturas agrícolas. Na maioria das vezes, as condições em que os vegetais vivem são caracterizadas pela presença de vários tipos de estresses abióticos combinados (LIU *et al.*, 2019). Nestas condições, os vegetais desenvolvem diferentes respostas bioquímicas, fisiológicas e moleculares, as quais vão desde modificações na expressão gênica, na biossíntese de proteínas especiais e metabólitos secundários, alterações na sinalização hormonal e atividades antioxidantes (FARHANGI-ABRIZ & GHASSEMI-GOLEZANI, 2019).

Dentre os diversos estresses abióticos (GE *et al.*, 2019; KUCZYŃSKA *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2019; YAO *et al.*, 2019), o estresse hídrico é um dos mais comuns no semiárido brasileiro e seu efeito pode variar dependendo de sua severidade e duração, desencadeando mudanças morfológicas e fisiológicas, como por exemplo, reduções na expansão celular, na área foliar, podendo promover fechamento estomático e aumento da abscisão foliar, o que reflete em menor taxa de assimilação de CO₂ e acúmulo de fitomassa (SALEMI *et al.*, 2019; VASCONCELOS *et al.*, 2019).

O estresse térmico decorre dos extremos de temperatura, de modo que seus efeitos são proeminentes por reduzirem o crescimento das plantas, alterando vários processos morfológicos, anatômicos, fenológicos, fisiológicos e bioquímicos, de modo que lesões diretas incluem desnaturação e agregação de proteínas e aumento da fluidez dos lipídios da membrana plasmática, enquanto as lesões indiretas ou mais lentas incluem inativação de enzimas nos cloroplastos e mitocôndrias, inibição da síntese de proteínas, degradação de proteínas e perda da integridade da membrana (BHATTACHARYA, 2019a, b e c).

A combinação ou ação isolada de estresses abióticos provoca geração de espécies reativas de oxigênio (EROs), estresse oxidativo e desequilíbrio celular, notadamente, devido às reações

metabólicas celulares, como as atividades fotoquímicas dos fotossistemas I (PSI) e II (PSII) (GHASSEMI-GOLEZANI & FARHANGI-ABRIZ, 2019). Estes pesquisadores destacam que os principais mecanismos celulares suscetíveis à lesão por EROs são fosfolipídios, ácidos nucléicos, carboidratos e proteínas, sendo necessária ativação do metabolismo antioxidativo para sua eliminação via ação enzimática.

Condições ambientais adversas podem resultar em estresse oxidativo devido ao aumento na produção de EROs em várias organelas celulares (TRIPATHI *et al.*, 2017; BANERJEE *et al.*, 2018a, BANERJEE *et al.*, 2018b). Existem diferentes formas de EROs, como o peróxido de hidrogênio (H₂O₂), radical hidroxila (OH[•]), oxigênio singlete (¹O₂) e o radical superóxido (O₂^{-•}), que, em elevadas quantidades, oxidam componentes celulares (MITTLER, 2017; WASZCZAK *et al.*, 2018; SINGH *et al.*, 2019).

3.3. Seed priming, modulação de crescimento e indução de tolerância aos estresses

O crescimento vegetal e a atuação de estresses abióticos podem ser influenciados por inúmeras estratégias desenvolvidas pelas plantas, além de técnicas diferenciadas de manejo adotadas nos sistemas de cultivos agrícolas, como por exemplo a manipulação de fatores como luz, temperatura, potencial osmótico, teores de nutrientes e balanço hormonal. Neste contexto, o pré-tratamento de sementes por condicionamento hídrico (*seed priming*) consiste em submeter as sementes às condições estressantes e substâncias atenuadoras para induzir maior crescimento e tolerância aos estresses abióticos (BLUNK *et al.*, 2019; HUSSAIN *et al.*, 2019; MAJEED *et al.*, 2019; RIZWAN *et al.*, 2019; SALEMI *et al.*, 2019).

No contexto, é importante ressaltar que os vegetais desenvolveram evolutivamente mecanismos de fotoproteção e reparo do PSII, uma vez que a exposição excessiva à luz pode danificar os fotossistemas e induzir a produção de EROs (JUNG *et al.*, 2020). De fato, o estresse por radiação luminosa pode induzir o metabolismo secundário para produção de substâncias de defesa (HÖLL *et al.*, 2019), de modo que estas substâncias podem desencadear resposta transcricional, levando à morte celular programada ou à tolerância ao estresse fotooxidativo (D'ALESSANDRO & HAVAUX, 2019).

Salienta-se que o crescimento e a fisiologia das plantas são fortemente influenciados pela luz vermelha mediada pelos fitocromos, a qual desempenha um papel importante na morfogênese foliar, na formação do aparato fotossintético e na acumulação de carboidratos; e pela luz azul mediada pelos criptocromos e pelas fototropinas que atuam na regulação da fotossíntese, na formação de clorofilas e a abertura dos estômatos (MIAO *et al.*, 2019). Estas luzes isoladas ou combinadas podem ser obtidas com a utilização de diodos emissores de luz (LEDs - *Light Emitting*

Diode), os quais são amplamente utilizadas nos cultivos agrícolas (AJDANIAN *et al.*, 2019; KONG *et al.*, 2019; MICKENS *et al.*, 2019). Outra forma de se obter essas variações de qualidade de luz é utilizando-se de filtros de luz branca, *e.g.*, papel celofane (COSTA *et al.*, 2024).

Os hormônios do crescimento vegetal, como as auxinas, ativam enzimas que agem sobre constituintes das ligações entre as microfibrilas de celulose da parede celular, causando a ruptura e o aumento da plasticidade, facilitando a entrada de água nas células e aumentando suas dimensões, além de promover a germinação e o crescimento de raízes (CAMPOS *et al.*, 2008). É importante ressaltar que a aquisição de reguladores vegetais sintéticos pode comprometer a renda dos agricultores devido ao seu elevado custo, o que justifica sua busca em fontes naturais como os extratos vegetais.

Neste contexto, suprir a necessidade de pequenos produtores quanto ao uso de produtos alternativos, configura-se em estratégia importante para ofertar fitormônios obtidos a partir de plantas com capacidade de produzir aleloquímicos, afim de promover a divisão e expansão celular, e conseqüentemente o crescimento vegetal, sendo a tiririca (*Cyperus rotundus* L.) uma das espécies com potencial para esta finalidade. De fato, o extrato de tiririca pode ser usado na indução de raízes devido à presença de ácido indolacético (AIA), principal hormônio formador de raízes, com expressiva ação na germinação de sementes (CAVALCANTE *et al.*, 2018).

Em pesquisa para avaliar o efeito de diferentes concentrações de extrato aquoso de tubérculos de tiririca utilizado como auxina natural comparadas à fonte sintética na germinação e desenvolvimento inicial das plântulas de beterraba, Cavalcante *et al.* (2016) verificaram que a concentração de 100% deste extrato, durante a embebição das sementes de beterraba, favoreceu o desenvolvimento inicial das plântulas e elevou a velocidade de germinação, sobretudo por ter provocado maior protrusão e desenvolvimento da raiz principal, quando comparado ao emprego da auxina sintética.

Em algumas pesquisas tem-se observado a interferência de extratos de tiririca na germinação de sementes de algumas espécies, por exemplo, milho, feijão e alface e na capacidade germinativa de cana-de-açúcar. Posteriormente, esta informação foi ratificada, haja vista que o extrato de tubérculos de tiririca interfere na qualidade fisiológica e na atividade de enzimas envolvidas no processo de germinação de sementes de milho, feijão, soja e alface (MUNIZ *et al.*, 2007).

Dentre os atenuadores de estresses abióticos em plantas, o silício merece destaque, sobretudo por se tratar de um elemento benéfico ao crescimento vegetal e por provocar modificações nas plantas para mitigação de condições adversas (JAVAID *et al.*, 2019). Os resíduos vítreos, *e.g.*, vidro âmbar, podem ser utilizados como fonte de silício pois possuem mais de 75% de

SiO₂ em sua composição. Grandes quantidades de vidro âmbar são produzidas diariamente para atender às demandas de recipientes, como por exemplo, de medicamentos, bebidas e produtos químicos, portanto, a reciclagem e o gerenciamento de resíduos de vidro âmbar tornaram-se um problema ambiental emergente. As preocupações ambientais e sociais aumentaram criticamente a necessidade de desenvolver novos métodos de conversão de resíduos em produtos úteis, minimizando o consumo de energia e matérias-primas, reduzindo assim os riscos ambientais (GONG *et al.*, 2016).

Dessa forma, a utilização de resíduos vítreos como fonte de Si é uma alternativa promissora, pois esse mineral vem sendo utilizado na agricultura para indução de tolerância a diversos estresses abióticos (JAVAID *et al.*, 2019; SOUSA *et al.*, 2019; ZHU *et al.*, 2019). Em relação aos danos oxidativos decorrentes do déficit hídrico, o Si pode aliviar a degradação de complexos proteicos da membrana dos tilacóides e auxiliar na captação e transferência da energia luminosa para síntese de ATP (WANG *et al.*, 2019).

Com o advento da tecnologia, o uso de micro e nanopartículas de silício vem sendo difundido na agricultura, sobretudo com a finalidade de atenuação de estresses abióticos (JALIL & ANSARI, 2019; KHAN & UPADHYAYA, 2019). A indução de tolerância pode ser obtida pela técnica de *seed priming* com micro e nanopartículas de Si, uma vez que aumento no crescimento vegetal, teores de pigmentos fotossintetizantes, condutância estomática, transpiração, taxa de assimilação de CO₂, atividades das enzimas antioxidantes (superóxido dismutase - SOD e catalase - CAT) e redução de EROs foram relatados em sementes de trigo submetidas a estresse por cádmio e atenuação por *seed priming* com nanopartículas de Si (HUSSAIN *et al.*, 2019).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Experimento I: *Seed priming* com qualidade de luz e extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*

4.1.1. Localização experimental

O experimento foi realizado entre os meses de outubro e dezembro de 2018, no Laboratório de Fitopatologia e em ambiente telado no Centro de Ciências Agrárias e Ambientais (CCAA) da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), localizado no município de Lagoa Seca - PB, nas coordenadas de Latitude 7° 09' S, Longitude 35° 52' W e altitude de 634 m.

4.1.2. Delineamento experimental

A aplicação do *seed priming* foi realizada em delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 4, com quatro repetições cada uma com 24 sementes. Os fatores consistiram em quatro condições de qualidade de luz (QLU) medidas com um luxímetro digital modelo LD-400 (LB - luz branca com emissão de 202 lumens m⁻², LA - luz azul com emissão de 108 lumens m⁻² e comprimentos de onda de 400 a 485 nm, LV - luz vermelha com emissão de 184 lúmens m⁻² e comprimento de onda de 600 a 680 nm, e VD - luz vermelho distante com emissão de 32 lúmens m⁻² e comprimento de onda de 680 a 720 nm) mais quatro concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *C. rotundus* (EAC0 - controle 0%, EAC25 - 25%, EAC50 - 50% e EAC100 - 100%) (Figura 1).

4.1.3. Condições de qualidade de luz

Foi utilizada câmara de germinação tipo *Biochemical Oxygen Demand* (B.O.D.) equipada com fitas de LED com luz branca (emissão de 205 lúmens m⁻²). Caixas tipo Gerbox[®] transparentes (11 x 11 x 3,5 cm de comprimento, largura e altura) foram usadas para obter a qualidade da luz. Para obtenção das luzes branca, azul e vermelha, as caixas foram cobertas com quatro camadas de celofane transparente, azul e vermelho, respectivamente. Para obtenção de luz vermelho distante, as caixas foram cobertas com duas camadas de celofane azul e duas vermelhas, totalizando quatro camadas (YAMASHITA *et al.*, 2011).

4.1.4. Preparação de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*

Tubérculos de *C. rotundus* foram obtidos em uma área no Campo Experimental do CCAA/UEPB (Latitude 7° 09' S, Longitude 35° 52' W e altitude 634 m). Para obtenção do EAC, os tubérculos frescos sem raízes foram lavados com água e detergente neutro e triturados. Posteriormente, 10,0 g do material triturado foi extraído com 200 ml de água destilada e seguido de filtração em papel filtro Whatman N° 1 para obter uma solução estoque com 100% de concentração do extrato (EAC100) (SIMÕES *et al.*, 2003) (Figuras 1A, 1B, 1C e 1D).

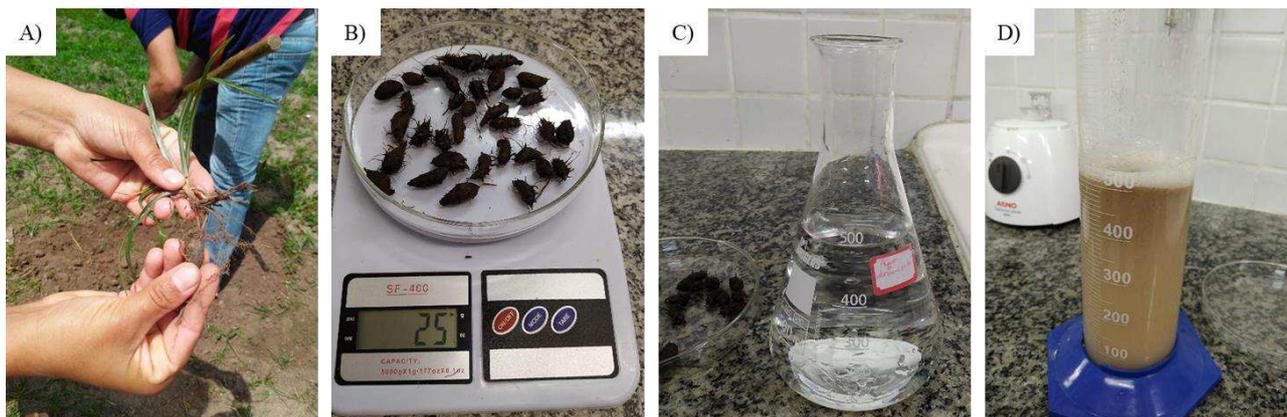


Figura 1. Coleta (A), pesagem (B) e preparo (C e D) do extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*.

As concentrações correspondentes a cada tratamento foram obtidas por diluição da solução estoque (EAC100) com água destilada da seguinte forma: tratamento controle (EAC0 - 0%) apenas água destilada, (EAC25 - 25%) diluição com 75% de água destilada + 25% de solução estoque, (EAC50 - 50%) diluição com 50% água destilada + 50% de solução estoque, (EAC100 - 100%) solução estoque sem diluição com água destilada (REZENDE *et al.*, 2013; SCARIOT *et al.*, 2017).

4.1.5. Aplicação do *seed priming*

Sementes de *Moringa oleifera* Lam., safra 2018 e lote 00016 (Arbocenter), foram utilizadas no experimento. Inicialmente, 4 amostras (100 sementes pesando 30 g) foram caracterizadas pelo comprimento ($10,59 \pm 1,58$ mm), largura ($9,61 \pm 0,90$ mm), peso ($0,29 \pm 0,06$ g), condutividade elétrica ($172\ 16 \pm 41,82$ $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$), teor de umidade ($11,57 \pm 0,30\%$), pureza (96%), matéria inerte (4%) e germinação (90%). Em seguida, as sementes foram submetidas a higienização com hipoclorito de sódio (1%) por 3 min (CARVALHO & CARVALHO, 2009). O procedimento foi realizado sob luz verde, reconhecida como luz de segurança por não influenciar os fitocromos (PARREIRA *et al.*, 2011).

Cada caixa recebeu um substrato composto por duas camadas de folha de papel germitest, umedecidas com soluções correspondentes a cada concentração de EAC com volume correspondente a aproximadamente 2,5 vezes a massa seca do papel germitest (FERREIRA *et al.*, 2017). As caixas com sementes foram acondicionadas em câmara de germinação tipo B.O.D, a temperatura de 30 ± 5 °C e fotoperíodo de 8 horas (PEREIRA *et al.*, 2015) durante 24 horas, tempo necessário para a embebição das sementes (fase II) sem concluir o processo de germinação (GUIMARÃES *et al.*, 2008) (Figuras 2A, 2B, 2C e 2D).



Figura 2. Acondicionamento das caixas Gerbox[®] contendo os tratamentos na câmara de germinação *Biochemical Oxygen Demand*.

Em seguida, as sementes foram secas em bandejas de polietileno (30 cm x 20 cm x 5 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente) por 24 horas. As bandejas foram forradas com duas camadas de papel absorvente e cobertas com celofane nas cores correspondentes às mesmas condições de iluminação aplicadas nos redutores.

4.1.6. Semeadura

Após a aplicação do *seed priming*, 48 horas após a secagem, as sementes foram semeadas a uma profundidade de 0,02 m em bandejas de polietileno, preenchidas com 3,0 dm³ de substrato arenoso autoclavado, com umidade mantida entre 90 e 100% da capacidade de campo (CC). As bandejas foram mantidas em ambiente telado com redução de 15% da luminosidade natural. O manejo da irrigação foi realizado diariamente pelo método de pesagens, em que foi reposta a água evapotranspirada no dia que antecedeu cada evento de irrigação (SILVA *et al.*, 2020) (Figuras 3A e 3B).

Para tanto, foi obtida a massa das bandejas de polietileno com dimensões de 30 cm x 20 cm x 5 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente, preenchidas com substrato seco (MSS, kg). Posteriormente, o substrato foi saturado com água de abastecimento local com volume inicial (VAI, L) correspondente a 75% (v/m) da massa do substrato e as bandejas acondicionados em bandejas de polietileno com maiores dimensões (40 cm x 30 cm x 5 cm de comprimento, largura e altura, respectivamente), sendo o sistema coberto com plástico preto e abrigado da luz para evitar perda de água por evaporação. Transcorridas 24 horas, o volume de água drenado (VAD, L) para a bandeja maior foi coletado e quantificado. Em seguida, foi obtida a massa das bandejas com o solo na capacidade de campo (MSC, kg).

A partir dos dados obtidos, foi calculado o volume de água no substrato em capacidade de campo (VAC, L), dado pela expressão $VAC = VAI - VAD$. Diariamente, foi realizada a pesagem das

bandejas, de modo a se obter a massa do substrato após evapotranspiração (MSET, kg). A massa de água evapotranspirada (MAET, kg) foi calculada pela diferença $MAET = MSC - MSET$. Posteriormente, o volume de água requerido (VAR, L) para reposição do solo à condição de capacidade de campo foi calculado utilizando-se da expressão $VAR = (VAC * MAET) / MSC$.

Para reposição do volume de água requerida, utilizou-se de proveta graduada em mililitros (mL) com capacidade volumétrica para 300 mL. As pesagens foram realizadas no período matutino. Para as pesagens, utilizou-se de balança digital portátil, modelo 123 Util.

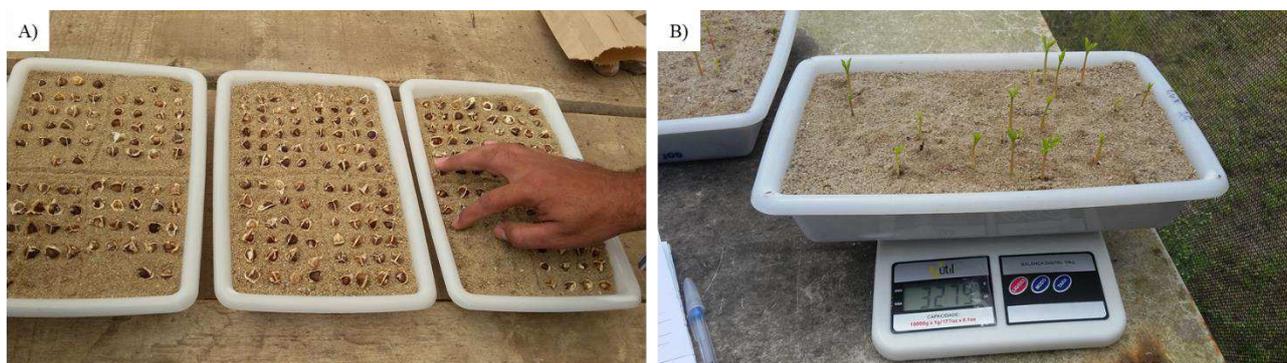


Figura 3. Semeadura (A) e manejo de irrigação (B) das plântulas de *Moringa oleifera*.

4.1.7. Variáveis avaliadas

As avaliações consistiram na quantificação de porcentagem de plântulas emergidas (PPE, %), índice de velocidade de emergência (IVE, adimensional), tempo médio de emergência (TME, dias), comprimento médio inicial da parte aérea (CIA, cm), comprimento médio final da parte aérea (CFA, cm), taxa de crescimento relativo da parte aérea (TCRA, $\text{cm cm}^{-1} \text{dia}^{-1}$), comprimento médio inicial da raiz (CIR, cm), comprimento médio final da raiz (CFR, cm), taxa de crescimento relativo da raiz (TCRR, $\text{cm cm}^{-1} \text{dia}^{-1}$), fitomassa inicial da parte aérea (FIA, mg), fitomassa final da parte aérea (FFA, mg), ganho relativo de fitomassa da parte aérea (GRFA, $\text{mg mg}^{-1} \text{dia}^{-1}$), fitomassa inicial da raiz (FIR, mg), fitomassa final da raiz (FFR, mg), ganho relativo de fitomassa da raiz (GRFR, $\text{mg mg}^{-1} \text{dia}^{-1}$) (FERRAZ *et al.*, 2017) (Figuras 4A, 4B, 4C e 4D).



Figura 4. Avaliações de crescimento das plântulas de *Moringa oleifera*.

4.1.7.1. Emergência de plântulas

A emergência das plântulas emergidas foi avaliada em intervalos de 24 horas, sendo consideradas emergidas as que apresentaram surgimento de epicótilo $\geq 2,0$ mm na superfície do substrato. A porcentagem de plantas emergidas foi calculada por avaliações feitas em 24 dias (Equação 1).

$$PPE = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) \times 100 \quad (1)$$

onde PPE é a porcentagem de plântulas emergidas, N_1 é o número de sementes colocadas para germinar e N_2 é o número de plântulas emergidas.

O índice de velocidade de emergência (IVE) estima o número médio de plântulas emergidas por dia e, assim, quanto maior o valor obtido do IVE maior é a velocidade de emergência e, conseqüentemente, maior vigor das plântulas (MAGUIRE, 1962). O IVE foi calculado pela Equação 2.

$$IVE = \left(\frac{100}{N} \right) \times \sum \left(\frac{n}{j} \right) \quad (2)$$

onde IVE é o índice de velocidade de emergência, N é o número de sementes semeadas, n é o número de plântulas emergidas no dia j (j é o número de dias após a semeadura) (A-AS-SAQUY & CORLETO, 1978).

O tempo médio de emergência (TME) corresponde à média ponderada do tempo necessário para a emergência, ou seja, quanto menor este tempo, maior será a velocidade de emergência (EDMOND & DRAPALA, 1958). O tempo médio de emergência foi calculado utilizando-se a seguinte relação (Equação 3).

$$TME = \frac{\sum t^n}{\sum n} \quad (3)$$

onde n é o número de plântulas emergidas e t é o número de dias após a semeadura (LABOURIAU & VALADARES, 1976).

4.1.7.2. Crescimento de plântulas

Transcorridos 13 dias de implantação do experimento, foram selecionadas duas plântulas uniformes por parcela. Essas plântulas foram medidas para obter o comprimento médio inicial da parte aérea (CIA) e comprimento médio inicial da raiz (CIR), os quais foram aferidos utilizando-se de régua graduada em mm. Posteriormente, as duas plântulas foram seccionadas em raiz e parte aérea. O material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e conduzido à estufa de circulação de ar forçada a 70 °C até atingirem massa constante, para posterior pesagem em balança analítica e determinação da fitomassa inicial da parte aérea (FIA) e fitomassa inicial da raiz (FIR) (FERRAZ *et al.*, 2017).

Transcorridos 21 dias de implantação do experimento, dentre as plântulas remanescentes, foram selecionadas duas por parcela, nas quais foram realizadas medições para determinação do comprimento médio final da parte aérea (CFA) e comprimento médio final da raiz (CFR). Posteriormente, o material vegetal foi seccionado, acondicionado e seco para determinação da fitomassa final da parte aérea (FFA) e fitomassa final da raiz (FFR) (FERRAZ *et al.*, 2017).

Foi realizada a determinação da taxa de crescimento relativo da parte aérea (TCRA), da raiz (TCRR), do ganho relativo de fitomassa da parte aérea (GRFA) e da raiz (GRFR), sendo essas variáveis obtidas por meio da seguinte relação (Equação 4).

$$R = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

onde R é a taxa de crescimento ou ganho relativo, ln é o logaritmo neperiano, W₁ é o comprimento ou fitomassa inicial, W₂ é o comprimento ou fitomassa final, t₁ é o tempo inicial e t₂ é o tempo final (ECHER *et al.*, 2010; FERRAZ *et al.*, 2017).

4.1.7.3. Pigmentos cloroplastídicos

Transcorridos 24 dias de implantação do experimento, dentre as plântulas remanescentes, foram coletados folíolos de duas plântulas uniformes, os quais foram envolvidos em papel alumínio e acondicionados em câmara refrigeradora a -20 °C. Para extração dos pigmentos, foram pesados 0,5 g de tecido foliar, o qual foi digerido em 6,0 mL de acetona (80%) durante 24 horas. Posteriormente, as amostras foram diluídas na proporção de 2:1 utilizando-se 2 mL de acetona (80%) para cada mL de amostra. As absorvâncias do extrato foram determinadas em espectrofotômetro, nos comprimentos de onda de 663, 646 e 470 nm, para clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b), carotenoides totais (Car t) e clorofilas totais (Chl t), respectivamente, sendo os teores dos pigmentos obtidos utilizando-se das equações de Lichtenthaler & Buschmann (2001) (Equações 5, 6, 7 e 8).

$$\text{Chl a } (\mu\text{g g}^{-1}) = 12,25 \times A_{663} - 2,79 \times A_{646} \quad (5)$$

$$\text{Chl b } (\mu\text{g g}^{-1}) = 21,5 \times A_{646} - 5,10 \times A_{663} \quad (6)$$

$$\text{Car t } (\mu\text{g g}^{-1}) = [1000 \times A_{470} - (1,82 \times \text{Chl a} - 85,02 \times \text{Chl b})]/198 \quad (7)$$

$$\text{Chl t } (\mu\text{g g}^{-1}) = (12,25 \times A_{663} - 2,79 \times A_{646}) + (21,5 \times A_{646} - 5,10 \times A_{663}) \quad (8)$$

Para converter os valores encontrados em $\mu\text{g mL}^{-1}$ para $\mu\text{g g}^{-1}$, os resultados obtidos foram multiplicados por 6,0 mL (volume do tubo de digestão) dividindo-se pela massa da amostra (0,5 g). Com os dados obtidos, foram calculadas as relações Chl a/Chl b e Chl a/Car t.

4.2. Experimento II: *Seed priming* com resíduos vítreos microparticulados como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha

4.2.1. Localização experimental

O experimento foi realizado no Laboratório de Fisiologia Vegetal da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, nas coordenadas de latitude 7° 12' 51,9" S, longitude 35° 54' 24,1" W e altitude de 551 m, e na Estação Experimental pertencente à Universidade Estadual da Paraíba, nas coordenadas latitude 07° 12' 42,99" S, longitude 35° 54' 36,27" W e altitude de 521 m, ambos localizados no município de Campina Grande - PB.

4.2.2. Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2 x 2 x 2. O fator *seed priming* (SP) foi constituído de um controle (NSP - sem aplicação de

seed priming), onde as sementes não passaram por nenhum tratamento, e *seed priming* com micropartículas de resíduos vítreos como fonte de silício (SPSi) sob irradiação com luz monocromática vermelha (LV) com emissão de 184 lúmens m⁻² e comprimento de onda de 600 a 680 nm. O fator reposição de água no solo (RAS) foi constituído de dois níveis (W50 - 50% e W100 - 100% da capacidade de campo). O fator variações de temperatura (VT) foi constituído por duas variações de temperatura (T30° - 30 °C dia/25 °C noite e T40° - 40 °C dia/35 °C noite, com fotoperíodo de 12 horas).

4.2.3. Aplicação do *seed priming*

O *seed priming* foi realizado no Laboratório de Fisiologia Vegetal da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA) do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), localizado no município de Campina Grande - PB, com clima equatorial semiárido, temperatura média de 25 °C e umidade relativa do ar variando entre 72 e 91% (FERRAZ *et al.*, 2022).

Uma câmara de germinação tipo B.O.D. foi adaptada para fornecimento de luz monocromática vermelha utilizando-se de painéis com lâmpadas de LED (*Light Emitting Diode*) RGB (*Red, Green e Blue*) com emissão de 184 lúmens m⁻². Em seguida, sementes de *M. oleifera* obtidas de três plantas matrizes com idade de três anos, localizadas no município de Catolé do Rocha - PB, foram submetidas a higienização conforme metodologia de Carvalho & Carvalho (2009) e descrito no Experimento I (4.1.5.) na temperatura de 25 °C e sob irradiação com LV.

Em seguida, as sementes foram colocadas para embebição em caixas tipo Gerbox[®] contendo a solução com micropartículas residuárias vítreas como fonte de silício (600 mg L⁻¹ de MPsSi). Vidro âmbar residuário provenientes de embalagens de bebidas descartáveis foram coletados no aterro municipal da cidade de Toledo - PR. Embalagens limpas e secas foram moídas manualmente e peneiradas em peneira com mesh de 400 Tyler, obtendo-se assim uma granulometria de pó com 23 µm. Em seguida, as caixas foram acondicionadas na B.O.D. com temperatura de 25 °C durante 24 horas. Posteriormente, as sementes foram transferidas para caixas Gerbox[®] sem tampa, com duas camadas de papel germitex secas, e submetidas à secagem na mesma condição de luminosidade e temperatura utilizadas durante a embebição por 72 horas (Figuras 5A, 5B e 5C).



Figura 5. Pesagem das micropartículas de vidro (A), embebição das sementes na solução (B) e acondicionamento em câmara de germinação *Biochemical Oxygen Demand* (C).

4.2.4. Formação de mudas e imposição de variações de temperatura e reposição de água no solo

As sementes do controle (NSP - sem aplicação de *seed priming*) e as obtidas do *seed priming* (SPSi) foram semeadas em vaso com capacidade volumétrica de 0,3 dm³ preenchido com substrato constituído de solo arenoso e húmus de minhoca na proporção de 3:1 com umidade próxima da capacidade de campo (Figuras 6A e 6B). Os vasos contendo as sementes foram transferidos para câmara de crescimento tipo Fitotron (*Weiss Technik, Tecnal*), localizada na Estação Experimental pertencente a Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), no município de Campina Grande - PB (Figuras 6C e 6D).

Em virtude da disponibilidade de apenas uma câmara Fitotron e para atender as variações de temperatura, o experimento foi conduzido em duas etapas, a primeira etapa com a condição de 30 °C dia/25 °C noite e umidade relativa do ar (UR) variando de 50 à 60% (T30°) e a segunda etapa com 40 °C dia/35 °C noite e UR variando de 40 à 50%.

O manejo da umidade do substrato foi realizado em turno de rega diário, utilizando-se do método de pesagens (SILVA *et al.*, 2020), em que foi reposta a água perdida por evapotranspiração da cultura (ET_c). Transcorridos 18 dias após a semeadura (DAS), foi realizada a imposição do estresse hídrico provocado pela reposição de 50% da ET_c (W50), enquanto que as demais parcelas sem estresse hídrico foram irrigadas com 100% da ET_c (W100) (Figura 6E e 6F).



Figura 6. Formação das mudas de *Moringa oleifera* (A e B), condicionamento em câmara de crescimento Fitotron (C e D) e manejo de irrigação (E e F).

4.2.5. Variáveis avaliadas

Aos 30 dias após a semeadura (DAS) foram avaliadas variáveis de trocas gasosas e aos 35 DAS foram avaliadas integridade da membrana celular e status hídrico foliar, indicadores de ajustamento osmótico, atividade do mecanismo antioxidante e acúmulo de matéria seca total. As análises foram realizadas no Laboratório de Ecofisiologia de Plantas Cultivadas (ECOLAB) da UEPB, localizado no Complexo Integrado de Pesquisa Três Marias (Figuras 7A, 7B, 7C, 7D, 7E, 7F, 7G e 7H).

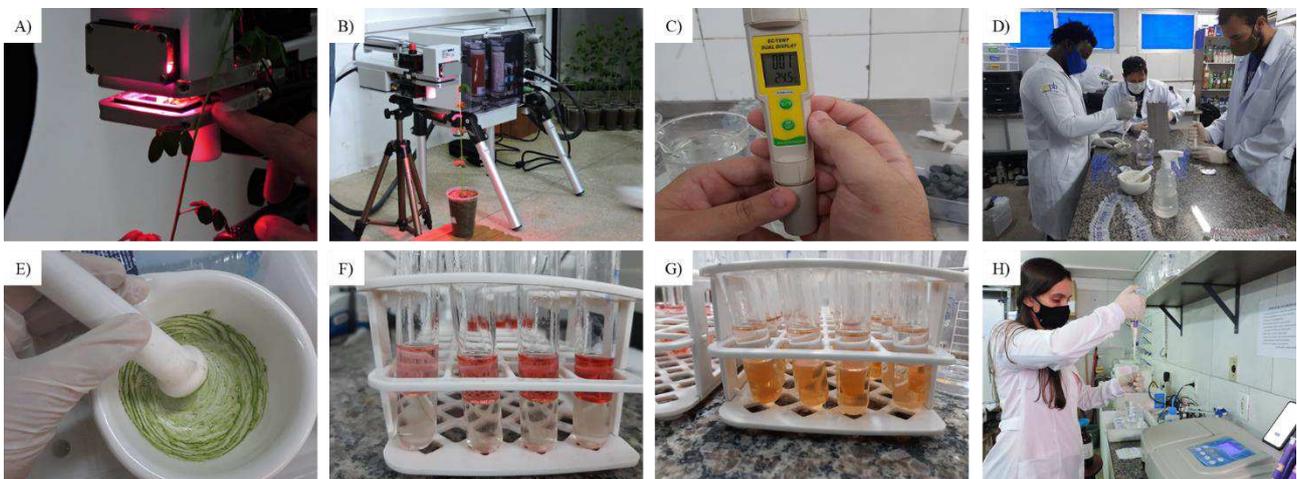


Figura 7. Avaliação das trocas gasosas (A e B), status hídrico (C) e análises bioquímicas (D, E, F, G e H).

4.2.5.1. Avaliação das trocas gasosas

A avaliação das trocas gasosas foi realizada em três folíolos completamente expandidos contados a partir da base para o ápice da muda, no período de 8 às 9 horas da manhã, com auxílio de um analisador de gases por infravermelho - IRGA (*Infra-red Gas Analyzer*) - GFS 3000 FL, configurado com concentração de CO₂ de 400 ppm e com uma fonte de luz artificial para fornecimento de fluxo de fótons de 1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Foram mensuradas a taxa fotossintética líquida (A, $\mu\text{mol of CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática (gs, mol de H₂O $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiração (E, mmol de H₂O $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e concentração interna de CO₂ (C_i, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

4.2.5.2. Integridade da membrana celular e status hídrico foliar

Para as análises de vazamento de eletrólitos intracelulares (VEIC, %) e conteúdo relativo de água (CRA, %) foi utilizada a metodologia descrita por Brito *et al.* (2011) com adaptação, em que, aos 35 DAS, 12 discos foliares, 6 para VEIC e 6 para CRA, com 113 mm² foram coletados utilizando-se de um vazador de cobre.

Para determinar o VEIC, os discos foram lavados três vezes em água deionizada para remover os solutos liberados durante o corte e alocados em placas de Petri com 6 mL de água deionizada. As placas foram armazenadas a 25 °C por 2 horas. Após a incubação, a condutividade elétrica no meio (CE_i) foi determinada usando um condutivímetro portátil (WATERPROOF). Em seguida, as amostras foram submetidas a temperatura de 80 °C por 90 min e a condutividade foi novamente medida (CE_f) e o vazamento de eletrólitos quantificado utilizando-se a Equação 9.

$$\text{VEIC} = \left(\frac{\text{CE}_i}{\text{CE}_f} \right) * 100 \quad (9)$$

onde VEIC é o vazamento celular, CE_i é a condutividade elétrica inicial do meio (dS m⁻¹) e CE_f é a final.

Para determinar o CRA, os discos foram pesados para determinação da massa fresca (MFD) e imediatamente colocados em placas de Petri contendo 6 mL de água deionizada, em seguida, as placas foram acondicionadas em câmara tipo B.O.D. com temperatura de 25 °C e luminosidade de 202 lúmens m⁻². Após 4 horas de exposição, os discos foram secos com auxílio de papel filtro e pesados para obtenção da massa túrgida dos discos (MTD). Os discos foram acondicionados em sacos de papel e transferidos para estufa de circulação forçada de ar a 60 °C por 48 horas e pesados

para determinação da massa seca dos discos (MSD), sendo o CRA quantificado utilizando-se da Equação 10.

$$\text{CRA} = \left(\frac{\text{MFD} - \text{MSD}}{\text{MTD} - \text{MSD}} \right) \times 100 \quad (10)$$

onde CRA é o conteúdo relativo de água, MFD é a massa fresca, MSD é a massa seca e MTD é a massa túrgida dos discos.

4.2.5.3. Indicadores de ajustamento osmótico

A determinação do teor de prolina (PRO, $\mu\text{mol g}^{-1}$ MF - matéria fresca) foi de acordo com o método colorimétrico descrito por Bates *et al.* (1973) e modificado por Bezerra Neto e Barreto (2011). Foram pesados 250 mg de tecido foliar fresco e macerados em 5 mL de ácido sulfossalicílico a 3%, e centrifugado a 2000 rpm por 10 min. Em seguida, o sobrenadante foi retirado e armazenado em tubos com capacidade 2,5 mL para posterior determinação da concentração de PRO.

Para extração de proteínas solúveis totais (PST, mg g^{-1} MF) em folíolos (PST-F) e em raízes (PST-R) foram utilizados 200 mg da massa fresca de folíolos e de raízes, respectivamente. O material vegetal foi macerado e depois foram adicionados 3,0 mL de tampão fosfato de potássio (100 mM, pH 7,0 + EDTA 1 mM) e, em seguida, colocado em tubos do tipo eppendorf para posterior centrifugação (5.000 força g), por um período de 10 min, em centrífuga refrigerada (4 °C). Após a extração, a concentração de PST foi determinada segundo a metodologia de Bradford (1976).

O extrato para aferição de açúcares solúveis totais (AST, mg g^{-1} MF) em folíolos (AST-F) e em raiz (AST-R) foi obtido a partir de 200 mg da massa fresca de folíolos e 100 mg da massa fresca de raízes, maceradas em 2 mL de etanol 80% (v/v). Após a maceração, o extrato foi adicionado aos tubos tipo eppendorf com capacidade para 2 mL, em seguida foram submetidos ao banho-maria (60 °C) por 30 min e transferidos à centrífuga (2.000 força g) para obtenção e coleta do sobrenadante. Após retirada do sobrenadante, foram adicionados mais 2 mL de etanol (80%) aos mesmos tubos, para uma nova extração, seguido de novo aquecimento em banho-maria e posterior transferência para a centrífuga. Os sobrenadantes das duas lavagens foram misturados em tubos tipo Falcon e armazenados em tubos eppendorf, totalizando 4 mL do extrato por amostra. A concentração de AST-F e AST-R foi realizada pelo método de “fenol-sulfúrico” descrito por Dubois *et al.* (1956).

4.2.5.4. Atividade do mecanismo antioxidante

Para as determinações das atividades das enzimas superóxido dismutase (SOD, $\mu\text{mol min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ PST) e catalase (CAT, $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \text{min}^{-1} \text{mg}^{-1}$ PST) em folíolos (SOD-F e CAT-F) e em raízes (SOD-R e CAT-R) foi utilizado o extrato enzimático obtido pelo mesmo procedimento descrito para PST.

Na determinação da atividade da SOD, à mistura de reação, constituída de 0,3 mL de metionina 130 μM ; 0,1 mL de azul de p-nitrotetrazólio (NBT) 2250 μM ; 0,1 mL de EDTA 3 μM ; 0,2 mL de riboflavina; 0,75 mL de água deionizada e 1,5 mL de tampão fosfato de sódio 50 mM em pH 7,8, foi adicionado 100 μL do extrato enzimático bruto. Em seguida, foi determinada a absorbância a 560 nm, que foi subtraída da leitura de absorbância da mistura de reação sem o extrato enzimático. Nestas condições, uma unidade de SOD foi definida como a quantidade de enzima necessária para inibir em 50% a fotorredução do NBT (GIANNOPOLITIS & RIES, 1977).

A atividade da CAT foi determinada após a adição de 100 μL do extrato enzimático bruto a 2,9 mL do meio de reação constituído de 500 μL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) 59 mM; 1,5 mL de tampão fosfato de potássio 0,05 M, pH 7,0 e 400 μL de água deionizada a 30 °C (HAVIR & MCHALE, 1987). A atividade da enzima foi determinada pelo decréscimo da absorbância a 240 nm.

4.2.5.5. Acúmulo de matéria seca total

Para quantificação do acúmulo de matéria seca total (MST, g) as mudas foram seccionadas em folíolos, caule, ramos e raiz. O material vegetal foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados e conduzido à estufa de circulação de ar forçado a 70 °C até atingirem massa constante, após secagem foram pesados em balança analítica com precisão de 0,0001 g e a MST determinada pelo somatório das matérias secas dos folíolos, caule, ramos e raiz.

4.3. Análise estatística

Os dados originais das variáveis resposta foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk (SHAPIRO & WILK, 1965). Atendidos os pressupostos de normalidade, os dados de cada variável foram padronizados, de modo a se obter a variável Z com média nula ($\bar{X} = 0,0$) e variância unitária ($s^2 = 1,0$), conforme a Equação 11.

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{s^2}$$

onde X é cada observação do conjunto de dados da variável, \bar{X} é a média e s^2 é a variância do conjunto de dados.

Os dados transformados foram submetidos ao procedimento exploratório de Análise de Componentes Principais (ACP). A escolha dos Componentes Principais (CPs) foi com base nos autovalores maiores que um ($\lambda > 1,0$) de acordo com o critério de Kaiser (1958), e que explicasse porcentagem maior que 10% da variância total (HAIR Jr. *et al.*, 2009). Os dados originais de cada CP foram submetidos à análise de variância multivariada (MANOVA). Foi utilizado teste de Roy ($p \leq 0,01$) e agrupamento hierárquico para o *seed priming* com qualidade de luz e extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*. Para o *seed priming* com resíduos vítreos microparticulados como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha foi utilizado teste T-quadrado de Hotelling ($p \leq 0,01$).

As variáveis não associadas a nenhum dos CPs foram removidas da ACP e submetidas à análise de variância univariada (ANOVA) pelo teste F com 95% de confiança (BARBOSA & MALDONADO JÚNIOR, 2015). Para estas análises foi utilizado o *software* Statistica v. 7.0 (STATSOFT, 2004).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Experimento I: *Seed priming* com qualidade de luz e extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*

5.1.1. Resultados

5.1.1.1. Componentes principais e variância multivariada

Quatro componentes principais (CPs) com $\lambda > 1$ e $s^2 > 10\%$ foram formados a partir da combinação linear de 18 variáveis originais em função da combinação de QLU e EAC com 78,74% de s^2 total. O CP₁ representa 27,91% de s^2 e foi formado pela combinação de CIA, TCRA, CIR, TCRR, FIA, GRFA e Car t; o CP₂ representa 21,44% de s^2 , formado por CFR, FFA, Chl a e Chl t; o CP₃ representa 16,61% de s^2 , formado por GRFR, Chl b, Chl a/Chl b e Chl a/Car t; e o CP₄ representa 12,79% de s^2 e foi formado pela combinação de PPE, IVE e FFR. As variáveis TME, CFA e FIR não foram combinadas em nenhum dos CPs e foram removidas da ACP para análises univariadas. Com base na MANOVA, foi verificada interação significativa entre as combinações de QLU e EAC nos quatro CPs formados (Tabela 1).

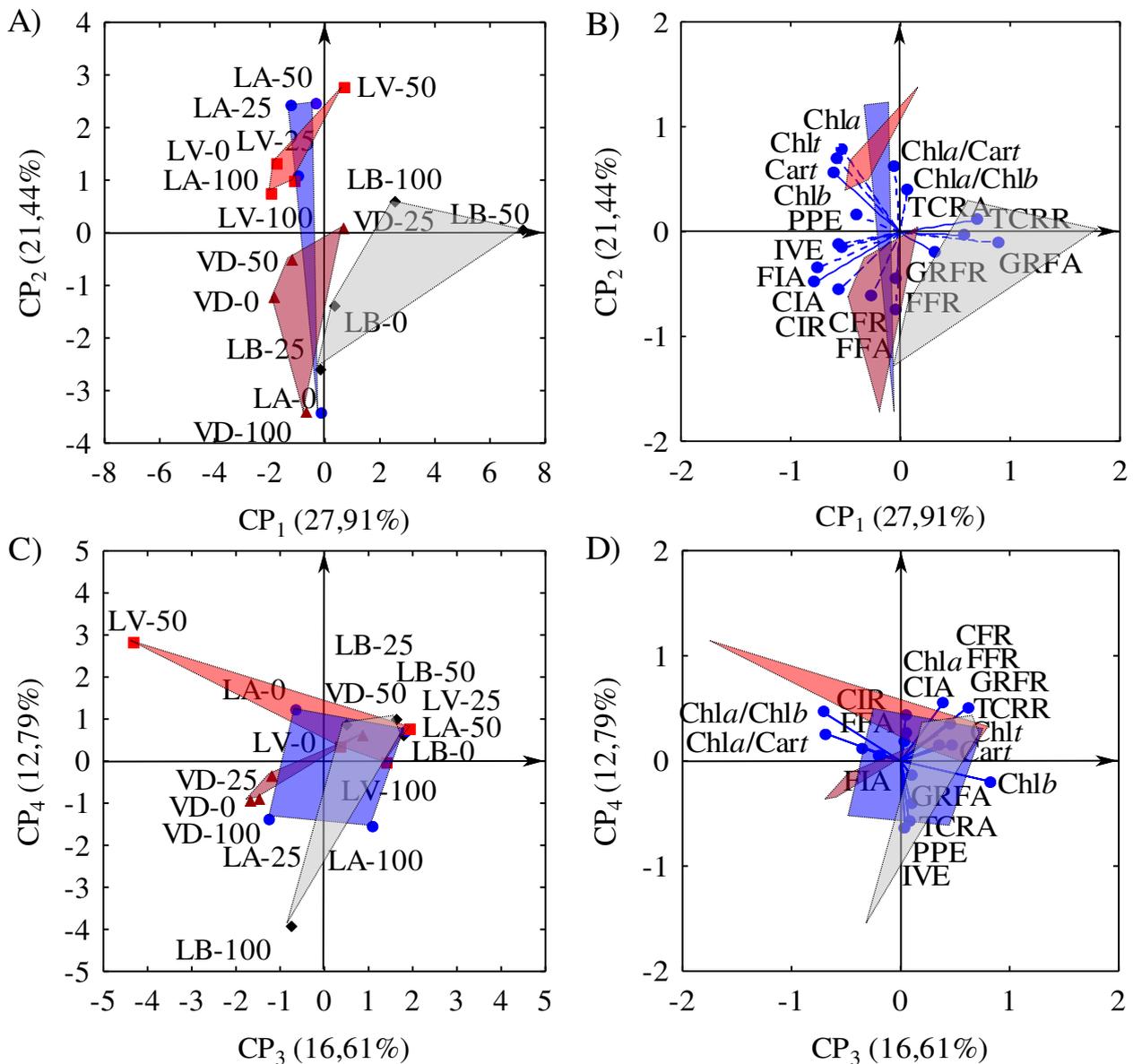
Tabela 1. Correlação entre variáveis originais e componentes principais, autovalores, variância explicada e acumulada e probabilidade de significância do teste de hipótese.

VA - Variáveis Avaliadas	Componentes Principais			
	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄
PPE - Porcentagem de plântulas emergidas	-0,56	-0,12	0,08	-0,57*
IVE - Índice de velocidade de emergência	-0,53	-0,15	0,04	-0,63*
CIA - Comprimento inicial da parte aérea	-0,78*	-0,48	0,03	0,19
TCRA - Taxa de crescimento relativo da parte aérea	0,70*	0,11	0,09	-0,40
CIR - Comprimento inicial da raiz	-0,55*	-0,55	-0,35	0,12
CFR - Comprimento final da raiz	-0,27	-0,62*	0,05	0,44
TCRR - Taxa de crescimento relativo da raiz	0,59*	-0,03	0,45	0,35
FIA - Fitomassa inicial da parte aérea	-0,75*	-0,35	-0,19	0,05
FFA - Fitomassa final da parte aérea	-0,03	-0,75*	-0,19	0,06
GRFA - Ganho relativo de fitomassa da parte aérea	0,91*	-0,11	0,10	-0,14
FFR - Fitomassa final da raiz	-0,03	-0,45	0,39	0,55*
GRFR - Ganho relativo de fitomassa da raiz	0,32	-0,20	0,62*	0,51
Chl a - Teor de clorofila a	-0,52	0,77*	0,05	0,28
Chl b - Teor de clorofila b	-0,39	0,16	0,83*	-0,20
Cart - Teor de carotenoides totais	-0,60*	0,55	0,47	0,16
Chlt - Teor de clorofilas totais	-0,57	0,69*	0,36	0,15
Chl a/Chl b - Relação entre as clorofilas a e b	0,06	0,40	-0,71*	0,46
Chl a/Car t - Relação entre clorofila a e carotenoides	-0,05	0,62	-0,69*	0,26
λ - Autovalores	5,02	3,86	2,99	2,30
s ² (%) - Variação explicada	27,91	21,44	16,61	12,79
s ² (%) - Variação acumulada	27,91	49,34	65,95	78,74
MANOVA - Análise de variância multivariada	Probabilidade de significância (p valor)			
Teste de Roy para qualidade de luz - QLU	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Teste de Roy para extrato aquoso de <i>Cyperus rotundus</i> - EAC	0,11	< 0,01	< 0,01	0,09
Teste de Roy para interação QLU x EAC	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,04

*: variáveis consideradas na formação do CP.

Na projeção bidimensional dos dois primeiros CPs (Figura 8A e 8B), é possível observar que, no CP₁, o *seed priming* com QLU na região da LA, LV e do VD combinados com EAC desencadearam processos diferentes nas plântulas de *M. oleifera* em comparação à LB. Sementes irradiadas com luz vermelho distante sem adição de EAC (VD-0) e com adição de 50% de EAC (VD-50) originaram plântulas com maior CIA, CIR e FIA com consequente redução das TCRA, TCRR e GRFA que foram aumentadas nas plântulas originadas de sementes irradiadas com luz branca e adição de 50% (LB-50) e 100% (LB-100) de EAC; enquanto a LV-25 e LV-100 aumentaram os teores de Cart.

No CP₂, observa-se que sementes sob irradiação com luz azul e adição de 25% (LA-25) e 50% (LA-50) de EAC além da combinação LV-50 originaram plântulas com maiores teores de Chl a e Chl t, enquanto que a irradiação com LA sem adição de EAC reduz expressivamente os teores destes pigmentos. Ainda no CP₂, é possível observar que plântulas oriundas de sementes irradiadas com VD-100 e LA-0 tiveram maior CFR e FFA.



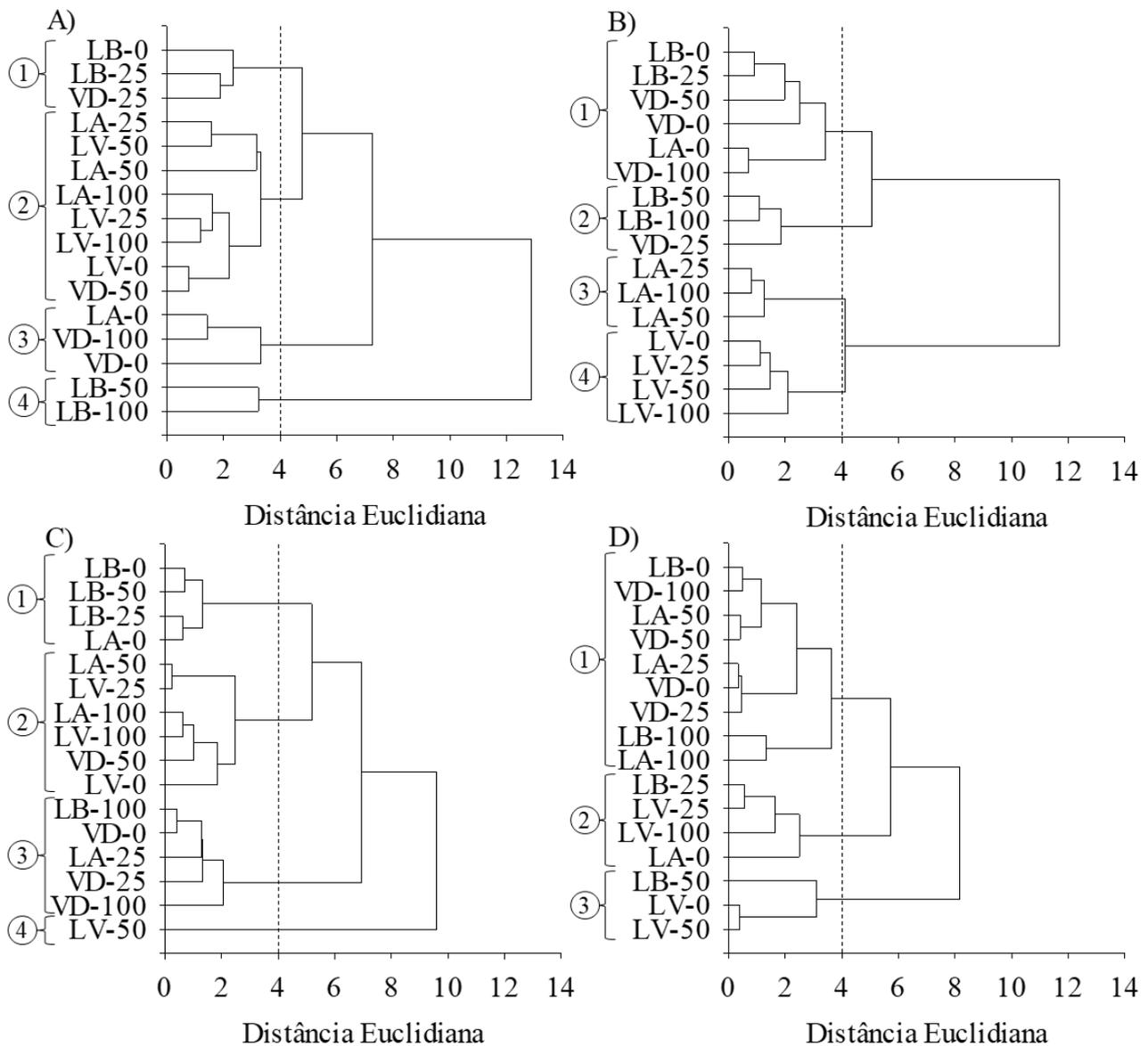
PPE: porcentagem de plântulas emergidas; IVE: índice de velocidade de emergência; CIA: comprimento inicial da parte aérea; TCRA: taxa de crescimento relativo da parte aérea; CIR: comprimento inicial da raiz; CFR: comprimento final da raiz; TCRR: taxa de crescimento relativo da raiz; FIA: fitomassa inicial da parte aérea; FFA: fitomassa final da parte aérea; GRFA: ganho relativo de fitomassa da parte aérea; FFR: fitomassa final da raiz; GRFR: ganho relativo de fitomassa da raiz; Chl a: teor de clorofila a; Chl b: teor de clorofila b; Cart: teor de carotenoides totais; Chl t: teor de clorofilas totais; Chl a/Chl b: relação entre as clorofilas a e b; Chl a/Cart: relação entre clorofila a e carotenoides; LB e ♦: luz branca; LA e ●: luz azul; LV e ■: luz vermelha; VD e ▲: luz vermelho distante; 0, 25, 50 e 100: concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*.

Figura 8. Projeção bidimensional dos escores fatoriais (A e C) e das variáveis (B e D) nos quatro primeiros componentes principais (CPs 1, 2, 3 e 4) da interação entre níveis de radiação do espectro luminoso e concentrações de extrato aquoso tubérculos de *Cyperus rotundus*.

Na projeção bidimensional do terceiro e quarto CP (Figura 8C e 8D), observa-se no CP₃ que a irradiação com LV possui efeito sinérgico sobre a concentração de 50% de EAC o que desencadeou um processo de aumento das relações Chl a/Chl b e Chl a/Cart devido ao aumento dos teores de Chl a e redução dos teores de Chl b e Cart. No CP₄, observa-se que o processo de

emergência das plântulas ocorre em maior porcentagem (PPE) e velocidade (IVE) sob irradiação das sementes com LB potencializada pela aplicação de 100% de EAC, o que está relacionado à redução do acúmulo de fitomassa final da raiz (FFR) e isso evidencia partição de reserva energética em maior quantidade para crescimento do hipocótilo e menor para crescimento da radícula.

Os *seed priming* da combinação de QLU com EAC foram agrupados em quatro grupos (1, 2, 3 e 4) no CP₁ (Figura 9A), CP₂ (Figura 9B) e CP₃ (Figura 9C) e em três grupos no CP₄ (Figura 9D) utilizando-se a Distância Euclidiana (DE) como medida de dissimilaridade e critério de inspeção visual subjetivo para estabelecimento do ponto de corte com $DE = 4$. Estes grupos são caracterizados por possuírem maior homogeneidade (similaridade) entre os *seed priming* de cada grupo e maior heterogeneidade (dissimilaridade) entre os grupos em relação às variáveis consideradas, o que se deve ao fato do método de Ward (Método da Mínima Variância) minimizar a soma de quadrados dentro do grupo.

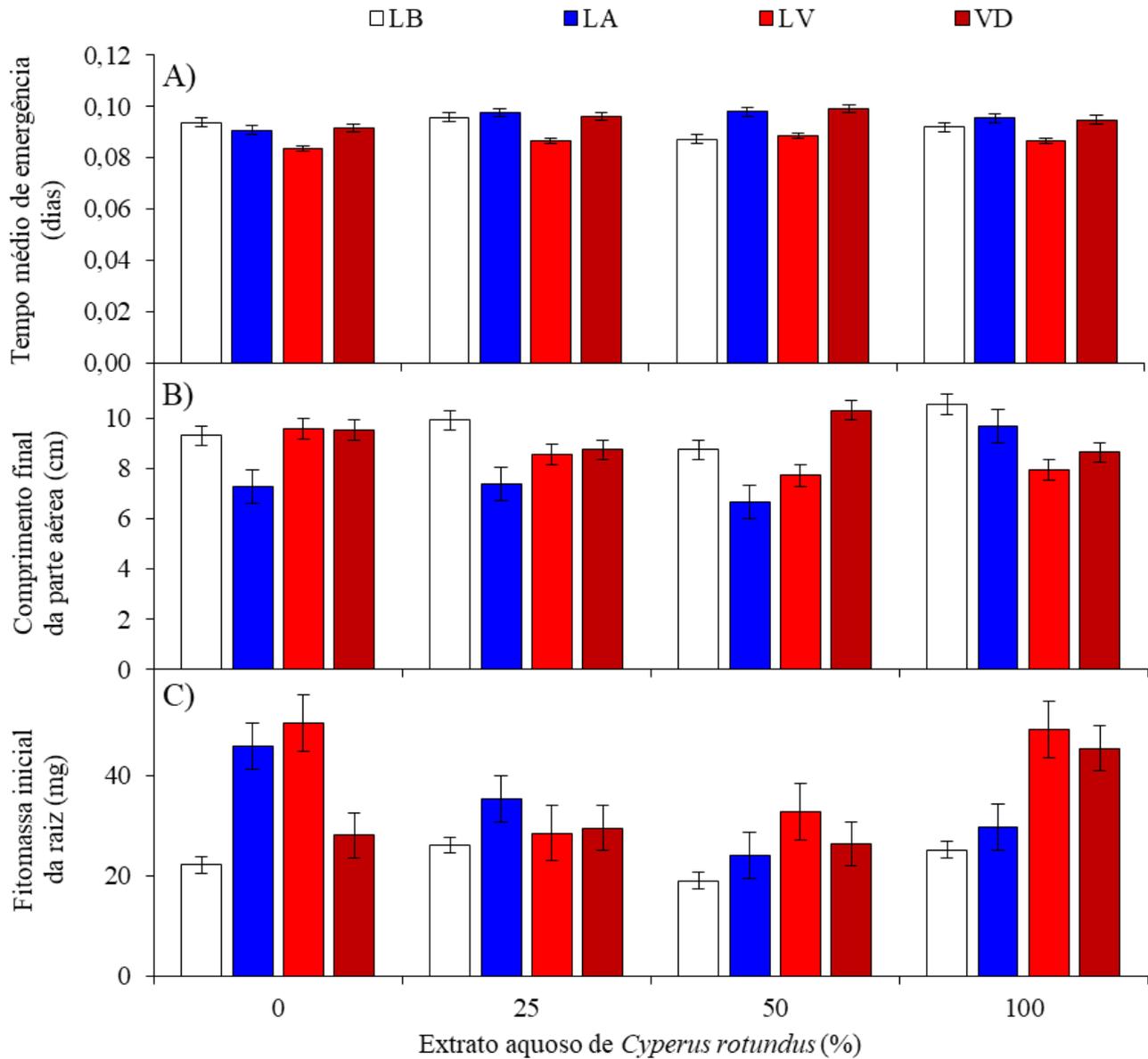


LB: luz branca; LA: luz azul; LV: luz vermelha; VD: luz vermelho distante.

Figura 9. Dendrogramas de agrupamento dos *seed priming* construídos com as variáveis do CP₁ (A), CP₂ (B), CP₃ (C) e CP₄ (D) em função da interação entre níveis de radiação do espectro luminoso e concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*.

Plântulas de *M. oleifera* tiveram menor tempo médio de emergência (0,086 dias) quando as sementes foram submetidas ao *seed priming* com luz vermelha (Figura 10A). Sementes irradiadas com luz LB e bioinduzidas com 100% de EAC originaram plântulas com maior CFA (10,55 cm), seguidas daquelas geradas a partir da combinação VD com 50% de EAC que tiveram CFA de 10,31 cm (Figura 10B). Sementes não tratadas com EAC geraram plântulas com maior acúmulo de fitomassa inicial da raiz (FIR) quando irradiadas com VD (50,38 mg) e LA (45,75 mg), respectivamente; já as plântulas geradas a partir de sementes tratadas com 100% de EAC tiveram

maior FIR quando as sementes foram irradiadas com LV e VD, com valores de 49,13 mg e 45,38 mg, respectivamente (Figura 10C).



LB: luz branca; LA: luz azul; LV: luz vermelha; VD: luz vermelho distante.

Figura 10. Tempo médio de emergência (A), comprimento médio final da parte aérea (B) e fitomassa final da raiz (C) de plântulas de *Moringa oleifera* em função da interação entre níveis de radiação do espectro luminoso e concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*.

Os valores das médias dos dados originais de todas as variáveis individuais avaliadas neste estudo e do teste F calculado (F_c) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Médias das variáveis avaliadas em função da interação entre qualidade de luz e concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*.

<i>Seed priming</i>	Média ± Desvio padrão						
	PPE	IVE	TME	CIA	CFA	TCRA	CIR
LB-0	36,46±10,42	3,41±0,93	0,09±0,01	6,79±0,38	9,30±0,45	0,04±0,01	3,65±0,54
LB-25	36,46±12,44	3,36±0,80	0,10±0,01	6,76±0,54	9,93±0,90	0,04±0,01	4,46±0,64
LB-50	22,92±8,67	2,02±0,80	0,09±0,01	3,93±1,29	8,75±0,94	0,09±0,02	3,25±2,02
LB-100	41,67±14,03	3,82±1,26	0,09±0,00	4,90±0,25	10,55±0,6	0,09±0,00	3,63±1,00
LA-0	34,38±14,97	3,15±1,42	0,09±0,00	6,54±0,78	7,29±0,93	0,01±0,01	4,81±0,77
LA-25	34,38±6,25	3,35±0,63	0,10±0,01	5,29±0,97	7,39±0,62	0,04±0,03	4,04±0,36
LA-50	32,29±13,77	3,18±1,45	0,10±0,01	6,11±0,48	6,68±1,12	0,01±0,01	3,44±0,95
LA-100	38,54±10,96	3,72±1,27	0,10±0,01	6,09±1,02	9,68±0,65	0,05±0,02	3,88±0,90
LV-0	31,25±8,67	2,60±0,74	0,08±0,01	6,20±1,23	9,58±1,21	0,05±0,03	4,45±0,54
LV-25	36,46±9,24	3,12±0,60	0,09±0,01	5,98±1,02	8,54±1,70	0,04±0,04	4,13±0,09
LV-50	30,21±6,25	2,66±0,48	0,09±0,01	5,58±0,55	7,71±1,59	0,03±0,03	4,21±1,31
LV-100	41,67±17,35	3,51±1,20	0,09±0,01	5,86±1,15	7,95±1,34	0,03±0,02	4,39±1,39
VD-0	35,42±7,22	3,26±0,89	0,09±0,02	6,45±1,02	9,53±1,61	0,04±0,01	4,45±0,38
VD-25	33,33±14,43	3,24±1,51	0,10±0,01	5,96±1,31	8,74±1,43	0,04±0,01	3,73±0,47
VD-50	33,33±4,81	3,31±0,62	0,10±0,01	6,36±0,24	10,31±1,45	0,05±0,02	4,64±0,45
VD-100	35,42±5,38	3,35±0,44	0,09±0,00	6,49±0,77	8,65±1,05	0,03±0,03	5,18±0,71
Teste F	0,67 ^{ns}	0,78 ^{ns}	1,37 ^{ns}	2,82 ^{**}	3,85 ^{**}	3,54 ^{**}	1,34 ^{ns}
	CFR	TCRR	FIA	FFA	GRFA	FIR	FFR
LB-0	6,24±0,96	0,06±0,03	37,00±7,54	129,88±16,81	0,14±0,02	22,13±5,95	77,13±25,58
LB-25	6,68±1,11	0,04±0,02	43,38±8,04	131,75±43,74	0,12±0,04	26,13±4,99	94,75±52,42
LB-50	5,06±0,20	0,07±0,07	13,88±6,79	114,38±50,40	0,23±0,07	19,00±19,14	84,75±110,17
LB-100	4,64±0,90	0,03±0,02	20,50±1,08	120,63±8,10	0,20±0,01	25,13±9,12	34,25±7,26
LA-0	5,81±0,46	0,02±0,01	43,75±9,19	141,63±30,45	0,13±0,04	45,75±21,43	137,25±75,37
LA-25	4,56±0,92	0,01±0,01	33,88±11,16	89,38±28,62	0,11±0,04	35,25±17,10	46,63±11,60
LA-50	4,65±0,73	0,04±0,02	41,38±17,72	90,75±24,66	0,09±0,03	24,13±8,44	71,75±22,56
LA-100	4,89±0,54	0,03±0,03	40,25±16,86	99,63±33,54	0,10±0,04	29,63±14,91	62,38±20,23
LV-0	5,61±0,92	0,03±0,02	41,50±12,55	128,75±38,25	0,13±0,05	50,38±17,50	64,00±15,17
LV-25	5,40±0,49	0,03±0,01	43,00±4,45	108,88±61,16	0,09±0,08	28,50±11,25	96,38±70,78
LV-50	5,60±1,05	0,03±0,03	34,13±3,61	110,75±49,53	0,12±0,06	32,63±7,77	56,61±1,79
LV-100	6,30±0,94	0,04±0,03	38,50±9,11	92,63±24,01	0,10±0,05	49,13±15,63	89,25±28,49
FR-0	5,38±0,74	0,02±0,01	72,13±55,06	155,38±92,26	0,09±0,05	28,00±7,67	43,13±9,67
VD-25	5,59±0,76	0,04±0,02	45,88±23,29	99,38±19,69	0,10±0,04	29,50±13,31	48,75±15,71
VD-50	6,38±1,72	0,03±0,02	45,50±11,55	132,50±9,03	0,12±0,03	26,38±4,13	68,63±13,55
VD-100	6,10±0,92	0,02±0,02	50,88±13,21	135,75±23,53	0,11±0,05	45,38±17,58	67,25±15,84
Teste F	2,22 [*]	1,18 ^{ns}	1,99 [*]	0,97 ^{ns}	2,98 ^{**}	2,22 [*]	1,42 ^{ns}
	GRFR	Chl a	Chl b	Cart	Chl t	Chl a/Chl b	Chl a/Cart
LB-0	0,14±0,06	305,83±58,31	108,16±11,84	188,15±26,12	413,99±69,63	2,81±0,30	1,62±0,15
LB-25	0,13±0,05	287,36±86,98	100,90±34,09	168,62±51,27	388,26±118,58	2,87±0,39	1,70±0,15
LB-50	0,16±0,08	254,22±49,73	99,51±21,58	153,49±28,35	353,72±71,18	2,56±0,09	1,66±0,05
LB-100	0,04±0,03	284,14±23,22	98,32±15,11	160,42±15,86	382,46±38,02	2,91±0,22	1,77±0,04
LA-0	0,11±0,08	263,18±42,35	92,83±11,11	150,95±20,87	356,02±53,4	2,82±0,13	1,74±0,05
LA-25	0,04±0,03	348,32±14,47	103,13±23,07	184,52±23,24	451,44±16,3	3,56±1,07	1,91±0,30
LA-50	0,12±0,06	371,27±42,23	132,13±22,43	209,04±20,62	503,40±64,66	2,84±0,17	1,77±0,03
LA-100	0,09±0,06	333,44±42,52	126,68±11,92	193,99±18,18	460,12±53,63	2,63±0,15	1,72±0,13
LV-0	0,03±0,02	364,43±58,41	131,70±27,55	208,98±36,30	496,14±85,9	2,79±0,14	1,75±0,02
LV-25	0,12±0,08	377,73±96,42	136,79±29,41	212,42±40,31	514,52±125,31	2,74±0,21	1,76±0,16
LV-50	0,06±0,03	389,61±104,93	51,60±37,5	178,24±52,44	441,20±142,02	11,83±9,32	2,20±0,06
LV-100	0,07±0,04	360,67±17,89	125,59±11,07	207,12±10,67	486,26±27,95	2,88±0,16	1,74±0,03
VD-0	0,05±0,02	315,33±60,62	105,92±20,38	177,73±35,17	421,25±81,00	2,98±0,00	1,78±0,01
VD-25	0,06±0,06	298,89±1,46	81,70±13,48	165,07±6,05	380,60±12,97	3,73±0,59	1,81±0,07
VD-50	0,11±0,04	351,97±36,79	115,66±19,72	209,15±23,96	467,63±52,51	3,08±0,43	1,68±0,05
VD-100	0,05±0,05	247,38±4,10	91,08±3,63	153,95±4,71	338,46±6,86	2,72±0,09	1,61±0,03
Teste F	2,41 [*]	2,82 ^{**}	4,17 ^{**}	2,31 [*]	2,36 [*]	3,63 ^{**}	6,20 ^{**}

PPE: porcentagem de plântulas emergidas; IVE: índice de velocidade de emergência; CIA: comprimento inicial da parte aérea; TCRA: taxa de crescimento relativo da parte aérea; CIR: comprimento inicial da raiz; CFR: comprimento final da raiz; TCRR: taxa de crescimento relativo da raiz; FIA: fitomassa inicial da parte aérea; FFA: fitomassa final da parte aérea; GRFA: ganho relativo de fitomassa da parte aérea; FFR: fitomassa final da raiz; GRFR: ganho relativo de fitomassa da raiz; Chl a: teor de clorofila a; Chl b: teor de clorofila b; Cart: teor de carotenoides totais; Chl t: teor de clorofilas totais; Chl a/Chl b: relação entre as clorofilas a e b; Chl a/Cart: relação entre clorofila a e carotenoides; LB: luz branca; LA: luz azul; LV: luz vermelha; VD: luz vermelho distante; 0, 25, 50 e 100: concentrações de extrato aquoso de tubérculos de *Cyperus rotundus*; **, * e ^{ns}: probabilidade de significância do teste $F p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$.

5.1.2. Discussão

A plasticidade das plantas está intimamente relacionada com as condições ambientais e com o balanço de fitormônios endógenos (MELO *et al.*, 2022). As interações entre QLU e EAC, na germinação, crescimento e variáveis de acúmulo de pigmentos cloroplastídicos se devem ao fato da luz ser o principal fator ambiental que influencia o alongamento, a divisão e a diferenciação celular e induz a fotomorfogênese vegetal, principalmente devido à excitação dos fotorreceptores desencadear a síntese de fitormônios (BÎLC & LUCHIAN, 2020).

Os mecanismos intrínsecos pelos quais a luz interage com os fitormônios em *M. oleifera* ainda não estão claros, principalmente durante *seed priming*. Porém, mudanças nos níveis de QLU promovem alterações microclimáticas que influenciam a fotomorfogênese e consumo de água de mini-estacas de *M. oleifera* tratadas com EAC em sistema de propagação vegetativa. Essa resposta ocorre devido à redução de temperatura do ar sob LA e aumento de temperatura do ar, umidade relativa do ar e temperatura do solo sob LV e VD (SILVA *et al.*, 2020).

Sabendo que a fotomorfogênese é regulada por um conjunto de fotorreceptores para percepção do sinal luminoso (KAMI *et al.*, 2010; NEFF, 2012), pode-se inferir que o *seed priming* com LV e VD influenciou a atividade dos fitocromos, *e.g.* phyA, phyB, phyC, phyD e phyE, pois estes fotorreceptores são responsáveis pela percepção e modulação da luz e a expressão gênica por meio de sistemas de transdução de sinais (OKA & YAMAMOTO, 2019). Isso explica a redução da PPE e do IVE e aumento do CIA, CIR e da FIA, que estão relacionados à maior produção de compostos fenólicos e flavonoides e consequente fotoproteção relatados em *M. oleifera*.

É possível que o *seed priming* com LA, LV e VD e doses de EAC tenham aumentado a ação dos fatores de interação com fitocromos (PIFs) a partir da fosforilação rápida, ubiquitinação e degradação mediada por proteassoma, o que acelerou a transição do estado de escotomorfogênese para o estado de desenvolvimento fotomorfogênico (LIANG *et al.*, 2020). Isso porque a interação QLU com EAC inibiu a atividade de phyA sob VD, e estimulou a ação de phyB sob LV promovendo maior germinação e crescimento (OH *et al.*, 2020), principalmente sob *seed priming* com LB-100, uma vez que LB é composta pelo balanço equilibrado de todas as cores.

Estas informações sobre o efeito de QLU e EAC são importantes para a tomada de decisões sobre o manejo de plântulas de *M. oleifera*, pois em cultivos adensados pode ocorrer competição por luz, o que estimula o alongamento do caule, reduz a alocação de fotossintatos para as folhas e prejudica o crescimento, fato que ocorre com maior frequência sob maior incidência de VD (KONG *et al.*, 2018; SHIBUYA *et al.*, 2020). Em cultivos com flutuações na disponibilidade de luz, VD aumenta a eficiência quântica dos fotossistemas (PSI e PSII) devido ao maior fluxo de elétrons,

aumento de H^+ no lumén do tilacóide e síntese de adenosina trifosfato (ATP) no estroma do cloroplasto (KONO *et al.*, 2020).

Nesta pesquisa, os conhecimentos gerados são importantes para induzir tolerância aos estresses abióticos em *M. oleifera* e permitir seu cultivo em ambientes restritivos, isso porque o estresse luminoso provocado durante o *seed priming* pode estimular a síntese e ação de fitormônios como auxina, ácido giberélico, citocininas, etileno e ácido abscísico para regulação dos mecanismos de defesa da planta (BANERJEE & ROYCHOUDHURY, 2016). Os resultados desse trabalho sugerem que a interação entre QLU e EAC induziu maior desenvolvimento do cloroplasto, o que explica o aumento na biossíntese das clorofilas, como já foi observado em *Arabidopsis thaliana* e *Camellia sinensis* (LIU *et al.*, 2020).

A ação da luz aumenta a síntese dos fitormônios endógenos e a ação destes pode ser incrementada pela utilização de fitormônios naturais obtidos a partir de espécies acumuladoras *e.g.* *C. rotundus*, uma vez que as plantas sintetizam auxinas que, quando utilizadas em quantidade supra ótimas, podem ter efeito herbicida e reduzem o crescimento (LV *et al.*, 2018; BIELESZOVÁ *et al.*, 2019), isso explica o menor desempenho de *M. oleifera* sob LB combinada com 50 e 100% de EAC.

O *seed priming* com LB ativou a fotopercepção e desencadeou respostas adaptativas para maior taxa de crescimento relativo das plântulas de *M. oleifera*. Isso porque, embora comprimentos de onda na região LA (400-500 nm) e LV (600-700 nm) do espectro visível sejam mais eficientes para a captura de CO_2 e liberação de O_2 , os aumentos verificados na TCRA sob LB e EAC podem estar relacionados ao fato de que até 50% da composição espectral da luz branca está situada entre 500 e 600 nm, abrangendo as luzes LA, LV e VD (MICKENS *et al.*, 2018).

5.2. Experimento II: *Seed priming* com resíduos vítreos microparticulados como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha

5.2.1. Resultados

5.2.1.1. Componentes principais e variância multivariada

Três componentes principais (CPs) com autovalor (λ) maior do que um e porcentagem de variância (s^2) maior do que 10% foram formados pela combinação linear entre 13 variáveis originais coletadas de mudas de *M. oleifera* geradas a partir do *seed priming* (SP) com micropartículas de vidro como fonte de silício (MPsSi) e submetidas às combinações de níveis de reposição de água no solo (RAS) e variações de temperatura (TC). Os três primeiros CPs explicam 86,87% da s^2 . O CP₁ representa 53,67% de s^2 , formado pela combinação entre status hídrico foliar

(conteúdo relativo de água - CRA), trocas gasosas foliares (condutância estomática - gs, transpiração - E e concentração interna de CO₂ - Ci), indicadores de ajustamento osmótico nos folíolos (prolina em folíolos - PRO, proteínas solúveis totais em folíolos - PST-F e açúcares solúveis totais em folíolos - AST-F) atividade da enzima catalase nos folíolos (CAT-F) e acúmulo de matéria seca total (MST). O CP₂ representa 18,72% da s², formado pela combinação entre a taxa fotossintética líquida (A), atividade da enzima superóxido dismutase nos folíolos (SOD-F) e acúmulo de MST. O CP₃ representa 14,49% da s², formado pelo indicador de ajustamento osmótico nas raízes (proteínas solúveis totais em folíolos - PST-R) e atividade do mecanismo antioxidante das raízes (SOD-R e CAT-R). O vazamento de eletrólitos celulares nos folíolos (VEIC), o teor de açúcares solúveis totais nas raízes (AST-R) e a atividade da SOD-R não se associaram a nenhum CP e suas s² foram desconsideradas na análise de componentes principais (ACP) para serem submetidas a uma análise de variância univariada (ANOVA). Houve interação significativa (p-valor ≤ 0,01) entre SP x RAS x TC nos três CPs, conforme resultados da análise de variância multivariada (MANOVA) (Tabela 3).

Tabela 3. Correlação entre variáveis originais e componentes principais, autovalores, variância explicada e acumulada e significância de probabilidade do teste de hipótese na interação dos três primeiros componentes principais (CPs 1, 2 e 3) entre o *seed priming*, níveis de reposição de água no solo e variações de temperatura em mudas de *Moringa oleifera*.

VA - Variáveis Avaliadas	CP - Componentes Principais		
	CP ₁	CP ₂	CP ₃
VEIC - Vazamento de eletrólitos intracelulares	-0,30	-0,06	0,28
CRA - Conteúdo relativo de água	-0,94*	-0,10	0,18
A - Taxa fotossintética líquida	-0,07	0,67*	0,45
gs - Condutância estomática	-0,80*	0,48	0,24
E - Transpiração	-0,89*	0,26	0,17
Ci - Concentração interna de CO ₂	-0,89*	0,30	-0,05
PRO - Prolina na folha	0,91*	0,05	0,19
PST-F - Proteínas solúveis totais na folha	0,85*	0,34	0,05
PST-R - Proteínas solúveis totais na raiz	-0,46	0,45	-0,71*
AST-F - Açúcares solúveis totais na folha	0,73*	-0,43	-0,38
AST-R - Açúcares solúveis totais na raiz	-0,33	-0,25	0,17
SOD-F - Superóxido dismutase na folha	-0,56	-0,70*	0,32
SOD-R - Superóxido dismutase na raiz	0,36	-0,28	0,54
CAT-F - Catalase na folha	-0,77*	-0,46	0,23
CAT-R - Catalase na raiz	0,47	-0,22	0,77*
MST - Matéria seca total	0,66*	0,57*	0,36
λ - Autovalores	6,98	2,43	1,88
s ² (%) - Variância explicada	53,67	18,71	14,49
s ² (%) - Variância acumulada	53,67	72,38	86,87
MANOVA - Análise de variância multivariada	Probabilidade de significância (p valor)		
Teste T-quadrado de Hotelling para <i>seed priming</i> - SP	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Teste T-quadrado de Hotelling para reposição de água no solo - RAS	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Teste T-quadrado de Hotelling para variações de temperatura - TC	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Teste T-quadrado de Hotelling para interação SP x RAS	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Teste T-quadrado de Hotelling para interação SP x TC	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Teste T-quadrado de Hotelling para interação RAS x TC	< 0,01	< 0,01	< 0,01

Teste T-quadrado de Hotelling para interação SP x RAS x TC < 0,01 < 0,01 < 0,01

*: Variáveis consideradas na formação do CP.

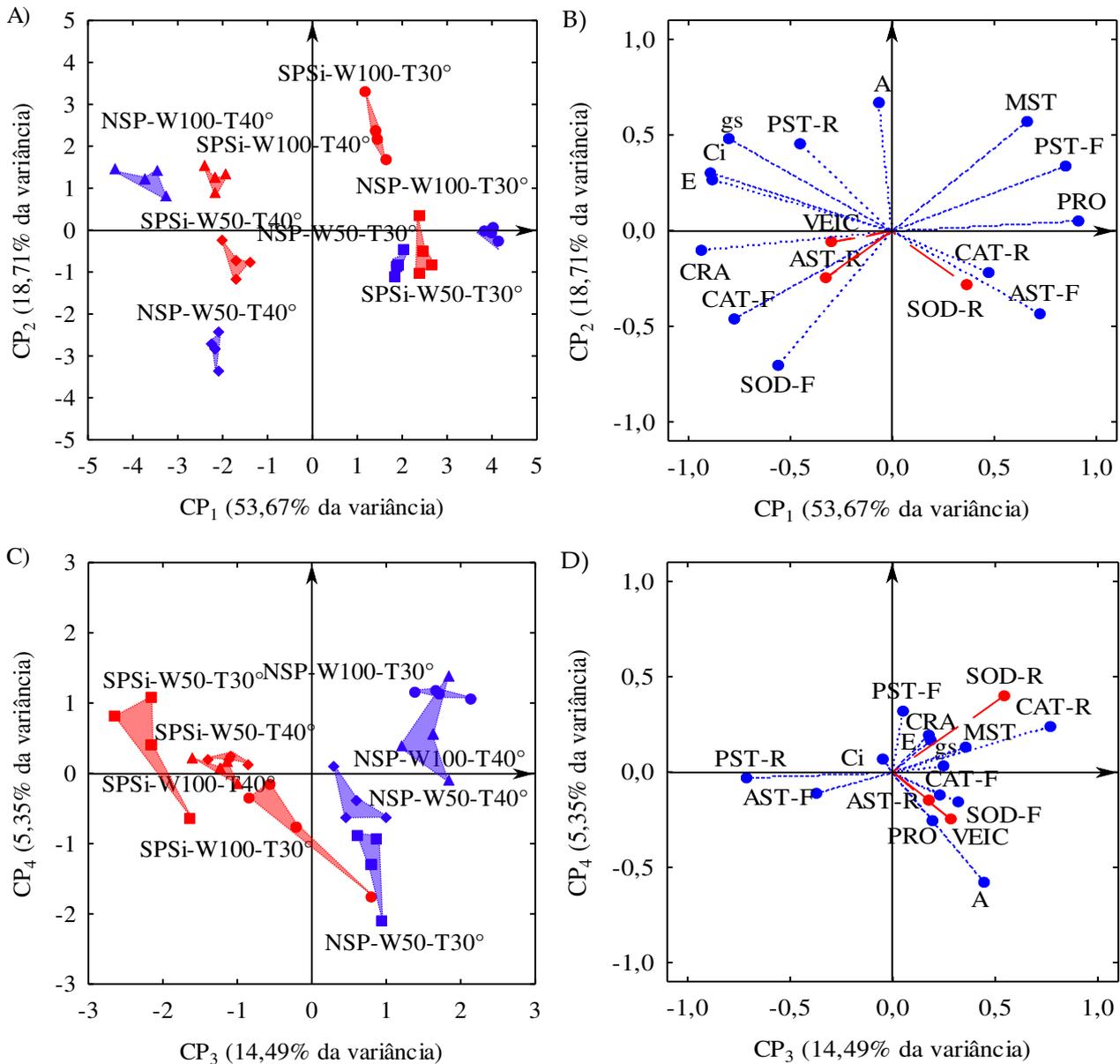
5.2.1.2. Respostas aos estresses térmico e hídrico e atenuação pelo *seed priming*

Na projeção bidimensional dos quatro primeiros CP (Figuras 11A, 11B, 11C e 11D), observa-se que o CP₁ é um processo desencadeado pelas variações de temperatura e (TC), o CP₂ é um processo desencadeado pelos níveis de reposição de água no solo (RAS) e o CP₃ é um processo desencadeado pelo *seed priming* (SP). No CP₁, observa-se que a variação de temperatura com estresse térmico (40 °C dia/35 °C noite) aumentou CRA, gs, E, Ci e CAT-L e reduziu o ajustamento osmótico nos folíolos (PRO, PST-F e AST-F) e o acúmulo de matéria seca total (MST) em relação às mudas que não foram submetidas ao estresse térmico (30 °C dia/25 °C noite). Porém, quando o *seed priming* (SP) com micropartículas de vidro como fonte de silício sob irradiação com luz monocromática vermelha (LV) foi aplicado, as mudas submetidas aos estresses térmico (SPSi-W100-T40°) e hídrico (SPSi-W50-T30°) isolados ou combinados (SPSi-W50-T40°) houve atenuação destes estresses através da redução de CRA, gs, E, Ci e CAT-F e aumento de PRO, PST-F, AST-F e MST. Em mudas que não foram submetidas aos estresses (SPSi-W100-T30°) o SP aumentou CRA, gs, E, Ci e CAT-F e reduziu PRO, PST-F, AST-F e MST em relação àquelas que não receberam *seed priming* (NSP-W100-T30°).

No CP₂, observa-se que o estresse hídrico provocado pela reposição de 50% de água no solo (W50) aumentou a atividade da enzima SOD-F e reduziu a taxa fotossintética líquida (A) e o acúmulo de MST das mudas em relação àquelas que não foram submetidas ao estresse hídrico (W100). O SP com MP_{Si} sob irradiação com LV atenuou os efeitos dos estresses hídrico e térmico combinados (SPSi-W50-T40°) em relação às mudas estressadas que não foram geradas do SP (NSP-W50-T40°), pois induziu menor atividade da SOD-F e maiores A e MST. O SP não atenuou o estresse hídrico quando este foi imposto de forma isolada (SPSi-W50-T30°) em comparação às mudas geradas de sementes que não passaram pelo SP (NSP-W50-T30°). Também é possível observar que em mudas não submetidas aos estresses (SPSi-W100-T30°) o SP provocou redução da atividade da SOD-F e aumento dos valores de A e MST em relação às mudas controle (NSP-W100-T30°).

No CP₃, verificou-se que a aplicação do SP com MP_{Si} e irradiação com LV provocou aumento no teor de proteínas solúveis totais nas raízes (PST-R) e redução da atividade da enzima catalase nas raízes (CAT-R) nas mudas submetidas aos estresses térmico (SPSi-W100-T40°) e hídrico (SPSi-W50-T30°) isolados e também quando esses estresses foram impostos simultaneamente (SPSi-W50-T40°) em relação às mudas que não foram geradas do *seed priming*

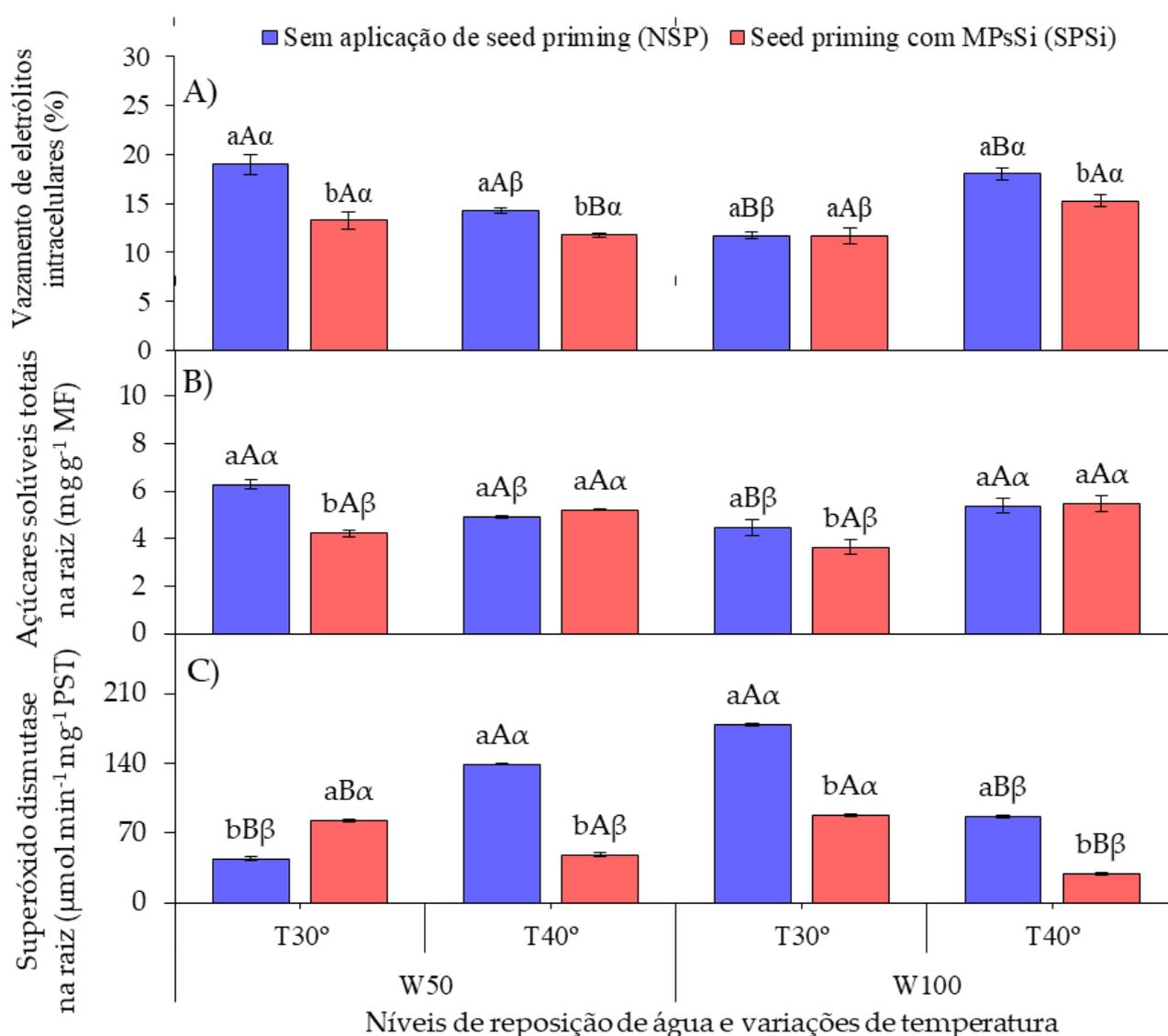
(NSP-W100-T40°, NSP-W50-T30° e NSP-W50-T40°). Isso também foi observado nas mudas que não foram submetidas aos estresses (SPSi-W100-T30°).



CP: Componente Principal; NSP: sem aplicação de *seed priming*; SPSi: *seed priming* com micropartículas de silício; W100: sem estresse hídrico; W50: com estresse hídrico; T30°: sem estresse térmico; T40°: com estresse térmico; VEIC: vazamento de eletrólitos intracelulares; CRA: conteúdo relativo de água; MST: matéria seca total; A: taxa fotossintética líquida; gs: condutância estomática; E: transpiração; Ci: concentração interna de CO₂; PRO: prolina na folha; PST-F: proteínas solúveis totais na folha; PST-R: proteínas solúveis totais na raiz; AST-F: açúcares solúveis totais na folha; AST-R: açúcares solúveis totais na raiz; SOD-F: superóxido dismutase na folha; SOD-R: superóxido dismutase na raiz; CAT-F: catalase na folha; CAT-R: catalase na raiz; ●: NSP-W100-T30°; ▲: NSP-W100-T40°; ■: NSP-W50-T30°; ◆: NSP-W50-T40°; ●: SPSi-W100-T30°; ▲: SPSi-W100-T40°; ■: SPSi-W50-T30°; ◆: SPSi-W50-T40°.

Figura 11. Projeção bidimensional de escores fatoriais (A e C) e variáveis (B e D) nos quatro primeiros componentes de interação principais (CPs 1, 2, 3 e 4) entre níveis de reposição de água no solo (W50 e W100) e variações de temperatura (T30° e T40°) em *Moringa oleifera*.

Na Figura 12A, observa-se que o SP com MPsi sob irradiação com LV aumenta a integridade das membranas das células em mudas de *M. oleifera* submetidas aos estresses térmico (SPSi-W100-T40°) e hídrico (SPSi-W50-T30°) isolados e combinados (SPSi-W50-T40°) uma vez que reduziu o vazamento de eletrólitos celulares (VEIC). Essa redução do VEIC não foi observada em mudas que não foram submetidas aos estresses (SPSi-W100-T30°). Quando o SP não foi aplicado, maiores valores de VEIC foram registrados nas mudas submetidas aos estresses térmico (NSP-W100-T40°) e hídrico (NSP-W50-T30°) isolados.



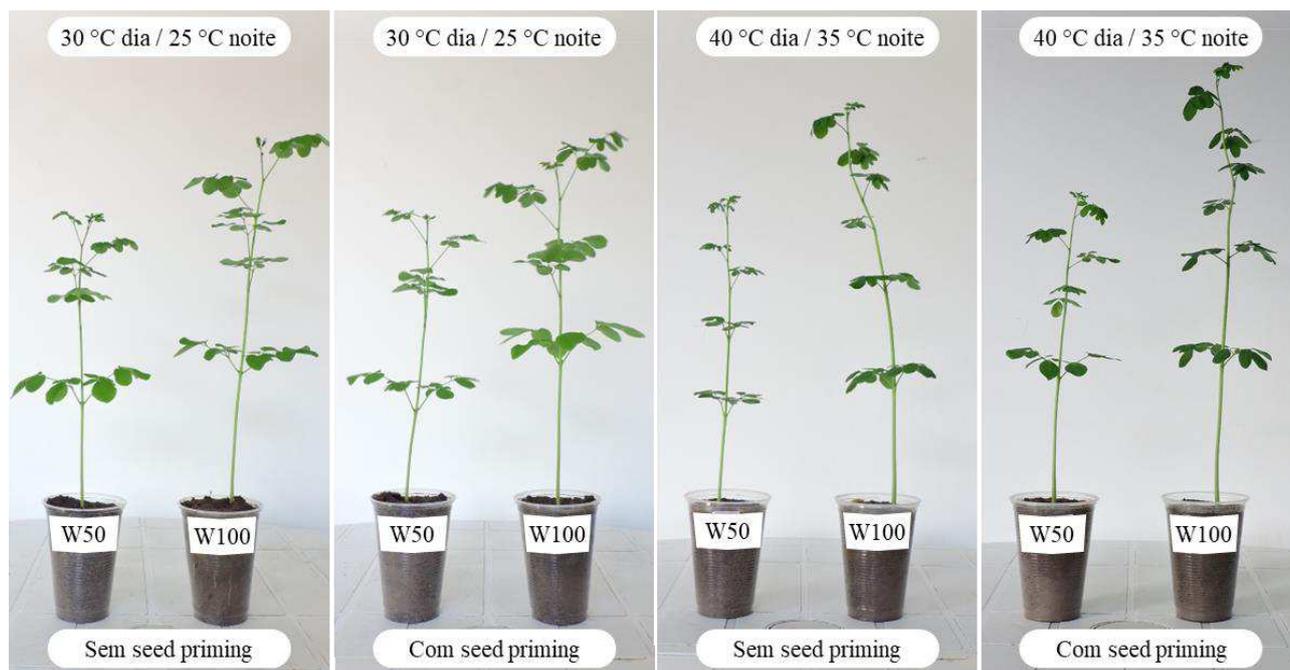
MF: matéria fresca; PST: proteínas solúveis totais.

Figura 12. Vazamento de eletrólitos intracelulares (A), açúcares solúveis totais na raiz (B) e superóxido dismutase na raiz (C) em função da reposição de água no solo e variações de temperatura em *Moringa oleifera*. Médias seguidas de letras iguais minúsculas para *seed priming*, maiúsculas para reposição de água no solo e gregas para variações de temperatura não diferem ($p > 0,05$) pelo teste t de Student.

Na Figura 12B vê-se que o SP provocou redução do teor de açúcares solúveis totais nas raízes (AST-R) das mudas que foram submetidas ao estresse hídrico isolado (SPSi-W50-T30°) e nas mudas que não foram submetidas aos estresses (SPSi-W100-T30°) em relação àquelas onde o SP não foi aplicado (NSP-W50-T30° e NSP-W100-T30°). Quando o SP não foi aplicado, as mudas submetidas ao estresse hídrico isolado (NSP-W50-T30°) tiveram maior acúmulo de AST-R.

Na Figura 12C pode-se observar que o SP induziu aumento da atividade da enzima superóxido dismutase nas raízes (SOD-R) de mudas submetidas somente ao estresse hídrico (SPSi-W50-T30°) em relação às que não receberam o SP (NSP-W50-T30°). Quando o SP não foi aplicado, as mudas submetidas aos estresses térmico e hídrico combinados (NSP-W50-T40°) e aquelas que não foram submetidas aos estresses (NSP-W100-T30°) tiveram elevada atividade da SOD-R, porém, a aplicação do SP reduziu a atividade da enzima nessas mudas (SPSi-W50-T40° e SPSi-W100-T30°). O SP também reduziu a atividade da SOD-R nas mudas submetidas ao estresse térmico isolado (SPSi-W100-T40°).

Na Figura 13 pode-se observar as diferenças provocadas pelos estresses térmico e hídrico no crescimento das mudas de *M. oleifera*. Sob estresse térmico (40 °C dia / 35 °C noite) as mudas apresentaram pecíolos encurtados e folhas menores com coloração verde escuro. Sob estresse hídrico (W50) as mudas apresentaram menor altura. No entanto, o *seed priming* com MPsSi sob irradiação com luz vermelha reverteu as diferenças provocadas pelos estresses combinados.



W50: com estresse hídrico; W100: sem estresse hídrico.

Figura 13. Mudanças de *Moringa oleifera* submetidas ao seed priming, reposição de água no solo e variações de temperatura.

Os valores das médias dos escores de cada CP, bem como o teste de comparação das médias desses escores, além das médias e do erro padrão das variáveis individuais originais podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4. Médias dos escores dos fatores para cada componente e médias \pm erro padrão das variáveis originais avaliadas em função da interação entre *seed priming*, níveis de reposição de água no solo e variações de temperatura em mudas de *Moringa oleifera*.

Componentes Principais	Com seed priming				Seed priming com MP _{Si}			
	W50		W100		W50		W100	
	T30°	T40°	T30°	T40°	T30°	T40°	T30°	T40°
Médias dos escores dos fatores para cada componente								
CP ₁	0,72bBa	-0,82bAβ	1,51aAα	-1,41bBβ	0,93aAα	-0,65aAβ	0,53bBa	-0,82aBβ
CP ₂	-0,52aBa	-1,80bBβ	-0,04bAβ	0,80aAα	-0,31aBa	-0,45aBa	1,52aAα	0,81aAβ
CP ₃	0,58aBa	0,41aBa	1,25aAα	1,17aAα	-1,56bBβ	-0,81bAα	-0,14bAα	-0,91bAβ
Variáveis Médias \pm Erro padrão das variáveis originais								
VEIC	19,00 \pm 0,32	14,27 \pm 1,02	11,71 \pm 0,66	18,00 \pm 0,32	13,27 \pm 0,19	11,78 \pm 0,92	11,73 \pm 0,66	15,27 \pm 0,80
CRA	83,72 \pm 0,79	99,75 \pm 0,37	79,81 \pm 0,33	111,88 \pm 1,00	79,65 \pm 0,33	101,98 \pm 0,95	79,62 \pm 0,67	95,52 \pm 0,86
MST	0,56 \pm 0,01	0,31 \pm 0,00	1,03 \pm 0,01	0,53 \pm 0,01	0,52 \pm 0,01	0,31 \pm 0,01	0,95 \pm 0,03	0,54 \pm 0,02
A	3,09 \pm 0,09	2,67 \pm 0,07	2,79 \pm 0,03	3,13 \pm 0,06	2,53 \pm 0,13	2,68 \pm 0,02	3,30 \pm 0,14	2,91 \pm 0,03
gs	16,00 \pm 0,45	20,83 \pm 0,05	14,53 \pm 0,34	33,97 \pm 0,16	14,70 \pm 0,46	19,90 \pm 0,71	22,93 \pm 0,61	24,93 \pm 1,09
E	0,49 \pm 0,02	0,67 \pm 0,01	0,43 \pm 0,02	1,10 \pm 0,09	0,45 \pm 0,00	0,75 \pm 0,02	0,57 \pm 0,00	0,81 \pm 0,01
Ci	86,37 \pm 1,29	181,33 \pm 2,68	78,53 \pm 0,78	233,07 \pm 3,47	119,90 \pm 0,18	152,03 \pm 1,42	167,17 \pm 0,78	199,67 \pm 1,56
PRO	796,05 \pm 2,16	60,68 \pm 0,83	650,88 \pm 10,71	27,25 \pm 1,04	475,88 \pm 2,06	44,08 \pm 0,46	521,93 \pm 0,77	28,15 \pm 0,35
PST-F	3,28 \pm 0,04	1,08 \pm 0,03	8,85 \pm 0,03	2,78 \pm 0,06	7,04 \pm 0,03	1,61 \pm 0,03	6,42 \pm 0,03	2,61 \pm 0,03
PST-R	2,38 \pm 0,12	1,94 \pm 0,05	0,92 \pm 0,05	3,50 \pm 0,16	4,02 \pm 0,16	4,58 \pm 0,03	3,89 \pm 0,14	6,58 \pm 0,11
AST-F	6,41 \pm 0,26	6,17 \pm 0,14	6,31 \pm 0,15	3,83 \pm 0,24	8,05 \pm 0,13	5,30 \pm 0,27	5,76 \pm 0,23	4,75 \pm 0,06
AST-R	6,28 \pm 0,06	4,93 \pm 0,20	4,48 \pm 0,30	5,39 \pm 0,33	4,23 \pm 0,03	5,21 \pm 0,13	3,64 \pm 0,32	5,47 \pm 0,31
SOD-F	69,10 \pm 1,23	180,92 \pm 5,13	32,55 \pm 0,24	89,75 \pm 1,57	22,52 \pm 1,07	83,62 \pm 0,48	21,76 \pm 0,42	32,23 \pm 0,22

SOD-R	44,26±0,60	138,98±1,54	178,90±0,89	86,46±1,07	82,21±1,57	48,22±1,28	87,32±1,03	29,05±1,32
CAT-F	7,47±0,19	16,47±0,53	3,25±0,15	11,15±0,68	2,41±0,14	7,41±0,68	1,98±0,13	10,68±0,47
CAT-R	26,56±1,42	14,81±0,90	42,60±1,29	18,67±0,58	7,66±0,39	5,91±0,13	4,74±0,55	4,40±0,31

CP: Componente Principal; W50 e W100: reposição de água no solo; T30° e T40°: variações de temperatura; VEIC: vazamento de eletrólitos intracelulares; CRA: conteúdo relativo de água; MST: matéria seca total; A: taxa fotossintética líquida; gs: condutância estomática; E: transpiração; Ci: concentração interna de CO₂; PRO: prolina na folha; PST-F: proteínas solúveis totais na folha; PST-R: proteínas solúveis totais na raiz; AST-F: açúcares solúveis totais na folha; AST-R: açúcares solúveis totais na raiz; SOD-F: superóxido dismutase na folha; SOD-R: superóxido dismutase na raiz; CAT-F: catalase na folha; CAT-R: catalase na raiz. Letras minúsculas comparam os *seed priming*, letras maiúsculas comparam os níveis de reposição de água no solo e as letras gregas comparam as variações de temperatura. Médias dos escores dos fatores de cada componente seguidas de letras iguais, para *seed priming*, maiúsculas para reposição de água do solo e gregas para variações de temperatura, na mesma linha, não diferem ($p > 05$) pelo teste t de Student.

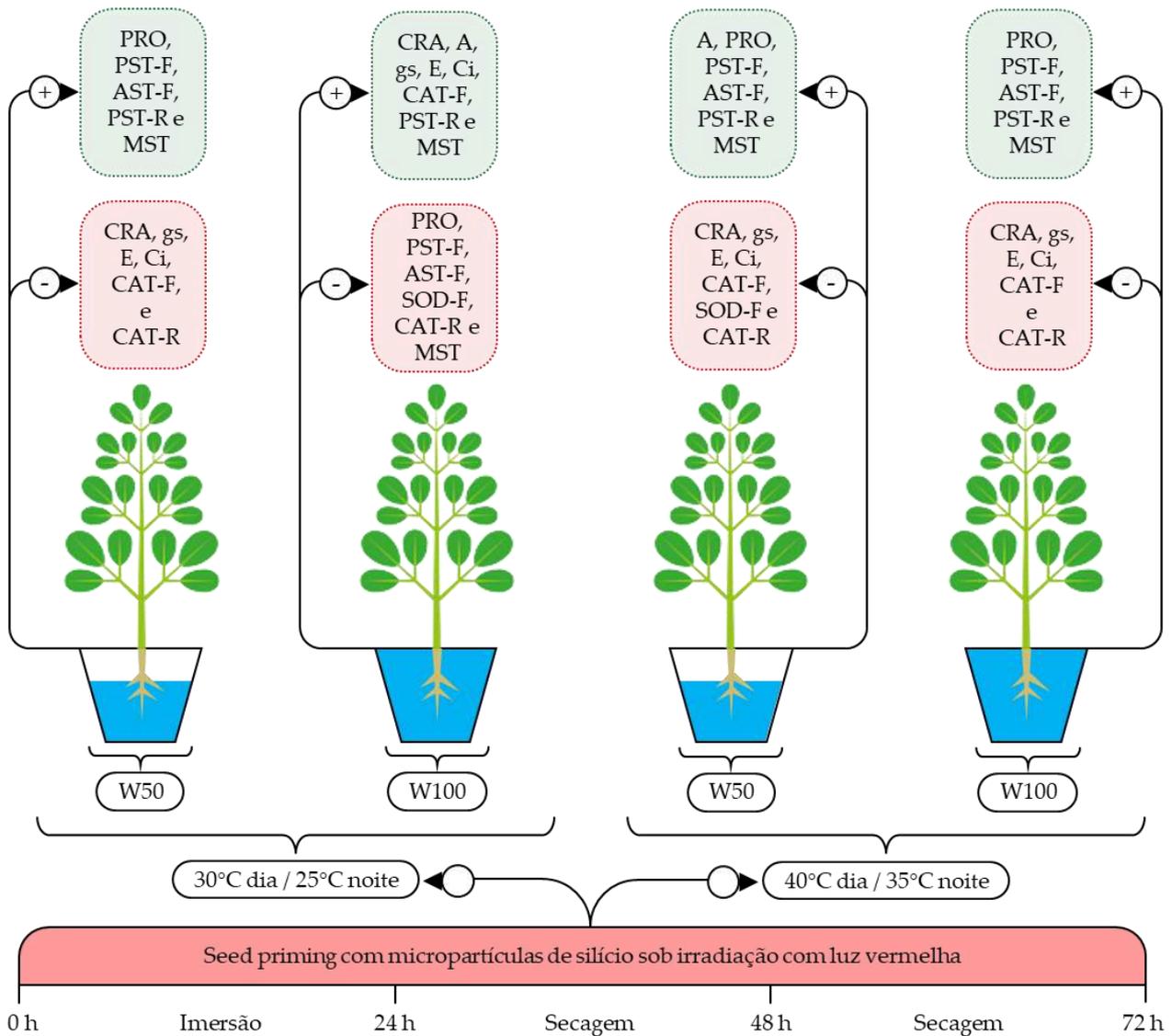
5.2.2. Discussão

A *M. oleifera* é uma árvore tropical considerada tolerante à restrição de água no solo e ao estresse por alta temperatura. Embora os mecanismos que permitem essa tolerância ainda sejam pouco compreendidos, já se sabe que quando as plântulas são expostas ao estresse térmico (35 °C dia/ 18 °C noite) uma das respostas metabólicas adaptativas é o acúmulo de carboidratos não estruturais, prolina e fenóis, notadamente para ajustamento osmótico e diminuição da perda de água para o ambiente por meio das trocas gasosas (MOHAMMED *et al.*, 2021).

Na presente pesquisa, no CP₁, as mudas que não foram submetidas ao SP, a redução de indicadores de ajustamento osmótico (PRO, PST-F e AST-F) e o aumento das trocas gasosas (gs, E e Ci) evidenciam desequilíbrio do mecanismo de tolerância, o que se deve à severidade do estresse térmico imposto (40 °C dia/35 °C noite), uma vez que a temperatura ótima para a fotossíntese, geralmente, ocorre entre 20 e 30 °C e em temperaturas superiores (acima de 45 °C, por exemplo) ocorre limitação da atividade e até mesmo desnaturação de enzimas do complexo fotossintético (YAMORI *et al.*, 2014). De fato, o aumento da atividade da CAT-F evidencia que o estresse térmico desencadeou limitações fotossintéticas responsáveis pela diminuição do acúmulo de MST, o que justifica o maior CRA nos folíolos, também relacionado ao aporte hídrico resultante da catalise de moléculas de peróxido de hidrogênio (H₂O₂).

Sob estresse hídrico, mudas de Moringa apresentam redução do teor de água nas folhas, diminuição do potencial hídrico foliar e perda de turgescência, fechamento dos estômatos, inibem a fotossíntese, prejudicam os processos metabólicos, diminuem a expansão celular, crescimento e desenvolvimento (GALGAYE *et al.*, 2020). Nessa pesquisa, no CP₂, também foram constatadas desordens fisiológicas em mudas submetidas ao estresse hídrico (50% da ETc), uma vez que houve aumento da atividade da SOD-F, possivelmente para catalisar a dismutação do ânion superóxido (O₂^{•-}) em O₂ e H₂O₂, e redução da A e do acúmulo de MST, o que se deve a diminuição da turgescência das células guarda e conseqüente redução da abertura estomática, refletindo em menor expansão celular e crescimento das mudas.

Quando o SPSi sob irradiação com LV foi aplicado, os efeitos dos estresses térmico e hídrico isolados ou combinados foram atenuados, uma vez que nessas condições de estresse houve aumento de A, PRO, PST-F, PST-R, AST-F e acúmulo de MST, e redução de CRA, gs, E, Ci e atividade da CAT-F, CAT-R e SOD-F (Figura 14). A atenuação ocorreu porque as MPsi transpõem as barreiras da parede celular e, ao entrarem em contato com as células vegetais, são captadas por vias plasmodesmáticas e translocadas por vias apoplásticas e/ou simplásticas (HUSSAIN *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2021), reduzindo a peroxidação lipídica ao diminuir os níveis de H₂O₂, o que restaura o equilíbrio redox e atenua o estresse oxidativo (ALI *et al.*, 2021). Além disso, a LV pôde ter potencializado o efeito das MPsi, pois, a irradiação com LV ativa os fitocromos phyA, phyB, phyC, phyD e phyE responsáveis pela recepção e modulação de luz, expressão gênica e transdução de sinais relacionados a regulação do crescimento, desenvolvimento, atividades metabólicas e respostas aos estresses térmico e hídrico (WANG *et al.*, 2021; COSTA *et al.*, 2024).



CRA: conteúdo relativo de água; MST: matéria seca total; A: taxa fotossintética líquida; gs: condutância estomática; E: transpiração; Ci: concentração interna de CO₂; PRO: prolina na folha; PST-F: proteínas solúveis totais na folha; PST-R: proteínas solúveis totais na raiz; AST-F: açúcares solúveis totais na folha; SOD-F: superóxido dismutase na folha; CAT-F: catalase na folha; CAT-R: catalase na raiz; W50: com estresse hídrico; W100: sem estresse hídrico.

Figura 14. Efeito do *seed priming* com micropartículas de silício sob irradiação com luz vermelha em mudas de *Moringa oleifera* submetidas aos estresses térmico e hídrico.

Quando o SP não foi aplicado ocorreu aumento do VEIC nos folíolos das mudas de *M. oleifera* submetidas aos estresses térmico e hídrico, o que também foi constatado por Martins *et al.* (2018), ao observarem que a deficiência hídrica (18 dias sem irrigação) induziu aumento do VEIC, uma vez que o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) provocou peroxidação lipídica e ruptura da membrana dos tilacóides causando limitação da fotossíntese. Porém, na pesquisa, quando o SP foi aplicado, houve redução do VEIC nas mudas de *M. oleifera* que foram submetidas aos estresses térmico e hídrico, o que pode ter ocorrido devido ao fato das MP_{Si} modularem a

plasticidade da parede celular, espessura da folha, relação água-planta, metabolismo e defesa da planta (MUKARRAM *et al.*, 2021).

O maior acúmulo de AST-R das mudas geradas sem SP e submetidas ao estresse hídrico é devido ao ajustamento osmótico, isso porque, sob restrição hídrica, as plantas previnem a perda de água através do fechamento estomático, modulam o crescimento e acúmulo de prolina e açúcares solúveis totais, ao mesmo tempo em que o crescimento radicular é estimulado, características associadas à tolerância ao déficit hídrico (LOZANO-MONTAÑA *et al.*, 2021). No entanto, quando o SP foi aplicado, houve redução do AST-R das mudas de *M. oleifera* sob estresse hídrico, isso indica que as MP_{Si} podem atuar no sistema radicular da espécie como ajustador osmótico em substituição aos osmorreguladores orgânicos, haja vista que a deposição de Si na parede celular, além de atuar como barreira física contra a perda de água, também pode aumentar o potencial osmótico para manutenção do status hídrico (SARKAR *et al.*, 2022).

Com base no exposto, pode-se inferir que mudas de *M. oleifera* ativam o mecanismo antioxidante do sistema radicular ao invés do ajustamento osmótico por vias orgânicas para superação dos efeitos negativos do estresse hídrico, isso porque foi verificado aumento da atividade da SOD-R das mudas geradas do SP quando submetidas à restrição hídrica. Por outro lado, SOD-R diminuiu quando o estresse térmico foi imposto, indicando que a tolerância induzida pelas MP_{Si} no sistema radicular é mais eficiente sob estresse hídrico do que sob estresse térmico. Aumento da SOD-R também foi observado por Deus *et al.* (2015) em resposta ao estresse hídrico durante o estágio inicial de desenvolvimento das plantas, o que foi justificado devido a raiz ser o principal órgão de percepção inicial da condição de baixa disponibilidade hídrica no solo.

Assim, como já foi sinalizado por Costa *et al.* (2024), a fotomorfogênese da *Moringa oleifera* é mediada pela interação entre luz, água e fitormônios durante o SP. Isso reforça a ideia de que a LV possui efeito sinérgico à ação das MP_{Si}, haja vista que a irradiação com LV ativa o phyB cuja atividade reduz os níveis do ácido abscísico (ABA), repressor da germinação, e aumenta os níveis de ácido giberélico (GA), estimulador da germinação (NEFF *et al.*, 2012), o que pôde ter gerado efeito de memória quando as sementes foram desidratadas. Essas informações são fundamentais para o manejo sustentável dos agroecossistemas cultivados com *M. oleifera*, sobretudo no Semiárido onde a ocorrência dos estresses térmico e hídrico são recorrentes.

6. CONCLUSÕES

1. O *seed priming* com luz vermelha reduziu o tempo médio de emergência, enquanto que as luzes azul, vermelha e vermelho distante associadas a 50% de extrato aquoso de tubérculos de *C.*

rotundus aumentaram o comprimento inicial da parte aérea e o acúmulo de pigmentos cloroplastídicos.

2. *Seed priming* com luz azul induziu a formação de plântulas com menor comprimento final da parte aérea, no entanto, a aplicação de 100% de extrato aquoso de tubérculos de *C. rotundus* reverteu o menor crescimento.

3. A luz branca associada às concentrações de 50 e 100% de fitormônios promoveu maior taxa de crescimento relativo da parte aérea de plântulas.

4. O *seed priming* com micropartículas de resíduos vítreos como fonte de silício sob irradiação com luz vermelha atenua os efeitos dos estresses térmico e hídrico em mudas de *Moringa oleifera* por meio da homeostase das trocas gasosas, status hídrico foliar, ajustamento osmótico e mecanismo antioxidante. Adicionalmente, demonstrou-se que o silício pode ser fornecido por meio de uma fonte acessível e residuária de vidros na escala micrométrica, que pode ser alcançada com processos tradicionais de moagem e peneiramento.

LITERATURA CITADA

- A-AS-SAQUI, M.; CORLETO, A. Effect of seed presowing hardening on seedling emergence of four forage species. **Seed Science & Technology**, v. 6, p. 701-709, 1978.
- AJDANIAN, L.; BABAEI, M.; AROIEE, H. The growth and development of cress (*Lepidium sativum*) affected by blue and red light. **Heliyon**, v. 5, p. e02109, 2019.
- ALI, L. G.; NULIT, R.; IBRAHIM, M. H.; YIEN, C. Y. S. Efficacy of KNO₃, SiO₂ and SA priming for improving emergence, seedling growth and antioxidant enzymes of rice (*Oryza sativa*), under drought. **Scientific Reports**, v. 11, p. e3864, 2021.
- AZAM, A.; NOUMAN, W.; REHMAN, U.; AHMED, U.; GULL, T.; SHAHEEN, M. Adaptability of *Moringa oleifera* Lam. under different water holding capacities. **South African Journal of Botany**, v. 129, p. 299-303, 2020.
- BAKKE, I. A.; SOUTO, J. S.; BAKKE, O. A.; SOUTO, P. C. Potencial forrageiro da Moringa. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M. G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da Moringa oleifera Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 82-92 p.
- BANERJEE, A.; ROYCHOUDHURY, A. Plant responses to light stress: oxidative damages, photoprotection, and role of phytohormones. In: AHAMMED, G.; YU, J. Q. (eds.). **Plant hormones under challenging environmental factors.** Berlin: Springer/Dordrecht, 2016. 181-213 p.
- BANERJEE, A.; TRIPATHI, D. K.; ROYCHOUDHURY, A. Hydrogen sulphide trapeze: environmental stress amelioration and phytohormone crosstalk. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 132, p. 46-53, 2018a.
- BANERJEE, A.; TRIPATHI, D. K.; ROYCHOUDHURY, A. The karrikin 'calisthenics': can compounds derived from smoke help in stress tolerance?. **Physiologia Plantarum**, v. 165, p. 290-302, 2018b.
- BAPTISTA, A. T. A.; SILVA, M. O.; GOMES, R. G.; BERGAMASCO, R.; VIEIRA, M. F.; VIEIRA, A. M. S. Protein fractionation of seeds of *Moringa oleifera* Lam and its application in superficial water treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 180, p. 114-124, 2017.

- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JUNIOR, W. **AgroEstat**: sistema para análises estatísticas de ensaios agrônomicos. 1. ed. Jaboticabal: FCAV/UNESP, 2015. 396 p.
- BATES, L. S.; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973.
- BERGAMASCO, R.; VIEIRA, A. M. S.; NISHI, L.; FALAVIGNA-GUILHERME, A. L.; PATERNIANI, J. E. S.; KLEIN, M. R. F.; ARAUJO, A. A.; SILVA, G. F. Aplicação da Moringa no tratamento de águas de abastecimento e residuárias. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M. G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da *Moringa oleifera* Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 93-144 p.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. N. **Análises químicas e bioquímicas em plantas.** 1. ed. Recife: UFRPE, 2011. 267 p.
- BHADRA, P.; MAITRA, S.; SHANKAR, T.; HOSSAIN, A.; PRAHARAJ, S.; AFTAB, T. Climate change impact on plants: plant responses and adaptations. In: AFTAB, T.; ROYCHOUDHURY, A. (eds.). **Plant perspectives to global climate changes: developing climate-resilient plants.** Academic Press: London, 2022. 1-24 p.
- BHATTACHARYA, A. Effect of high temperature on carbohydrate metabolism in plants. In: BHATTACHARYA, A. (ed.). **Effect of high temperature on crop productivity and metabolism of macro molecules.** Academic Press: Amsterdã, 2019b. 115-216 p.
- BHATTACHARYA, A. Effect of high temperature on protein metabolism in plants. In: BHATTACHARYA, A. (ed.). **Effect of high temperature on crop productivity and metabolism of macro molecules.** Academic Press: Amsterdã, 2019a. 217-309 p.
- BHATTACHARYA, A. Effect of high-temperature stress on the metabolism of plant growth regulators. In: BHATTACHARYA, A. (ed.). **Effect of high temperature on crop productivity and metabolism of macro molecules.** Academic Press: Amsterdã, 2019c. 485-591 p.
- BIELESZOVÁ, K.; PAŘÍZKOVÁ, B.; KUBEŠ, M.; HUSIČKOVÁ, A.; KUBALA, M.; MA, Q.; SEDLÁŘOVÁ, M.; ROBERT, S.; DOLEŽAL, K.; STRNAD, M.; NOVÁK, O. and ŽUKAUSKAITĖ, A. New fluorescently labeled auxins exhibit promising anti-auxin activity. **New Biotechnology**, v. 48, p. 44-52, 2019.
- BÎLC, B. A.; LUCHIAN, M. R. Aspects related to the relationship between phytochrome and phytohormones. **Biostudent**, v. 3, p. 81-102, 2020.
- BLUNK, S.; HEER, M. I.; MALIK, A. H.; FREDLUND, K.; EKBLAD, T.; STURROCK, C. J.; MOONEY, S. J. Seed priming enhances early growth and improves area of soil exploration by roots. **Environmental and Experimental Botany**, v. 158, p. 1-11, 2019.
- BOUMENJEL, A.; PAPADOPOULOS, A.; AMMARI, Y. Growth response of *Moringa oleifera* (Lam) to water stress and to arid bio-climatic conditions. **Agroforestry Systems**, v. 95, p. 823-833, 2021.
- 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. 248-254, 1976.
- BRITO, G. G.; SOFIATTI, V.; LIMA, M. M. A.; CARVALHO, L. P.; SILVA FILHO, J. L. Physiological traits for drought phenotyping in cotton. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, p. 117-125, 2011.
- CALONE, R.; MIRCEA, D. M.; GONZÁLEZ-ORENGA, S.; BOSCAIU, M.; LAMBERTINI, C.; BARBANTI, L.; VICENTE, O. Recovery from salinity and drought stress in the perennial *Sarcocornia fruticosa* vs. the annual *Salicornia europaea* and *S. veneta*. **Plants**, v. 11, p. e1058, 2022.
- CAMPOS, M. F.; ONO, E. O.; BOARO, C. S. F.; RODRIGUES, J. D. Análise de crescimento em plantas de soja tratadas com substâncias reguladoras. **Biotemas**, v. 21, p. 53-63, 2008.

- CARVALHO, D. B.; CARVALHO, R. I. N. Qualidade fisiológica de sementes de guanxuma em influência do envelhecimento acelerado e da luz. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, p. 489-494, 2009.
- CAVALCANTE, J. A.; LOPES, K. P.; PEREIRA, N. A. E.; PAIVA, L. G.; ABRANTES, J. V. Bioativadores naturais no desempenho fisiológico de sementes de beterraba. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 115, p. 229-237, 2016.
- CAVALCANTE, J. A.; LOPES, K. P.; PEREIRA, N. A. E.; SILVA, J. G.; PINHEIRO, R. M.; MARQUES, R. L. L. Extrato aquoso de bulbos de tiririca sobre a germinação e crescimento inicial de plântulas de rabanete. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, p. 39-44, 2018.
- COSTA, P. S.; FERRAZ, R. L. S.; DANTAS NETO, J.; MARTINS, V. D.; VIÉGAS, P. R. A.; MEIRA, K. S.; NDHLALA, A. R.; AZEVEDO, C. A. V.; MELO, A. S. Seed priming with light quality and *Cyperus rotundus* L. extract modulate the germination and initial growth of *Moringa oleifera* Lam. seedlings. **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e255836, 2024.
- COSTA, T. R.; REIS, V. C. R.; FERREIRA, R. R.; SILVA, L. S.; GONZAGA, A. P. D. Influência dos tratamentos pré-germinativos, térmicos e regime de luz na germinação de sementes de moringa (*Moringa oleifera* Lam.). **Diversitas Journal**, v. 6, p. 3763-3778, 2021.
- D'ALESSANDRO, S.; HAVAUX, M. Sensing β -carotene oxidation in photosystem II to master plant stress tolerance. **New Phytologist**, v. 223, p. 1776-1783, 2019.
- DEUS, K. E.; LANNA, A. C.; ABREU, F. R. M.; SILVEIRA, R. D. D.; PEREIRA, W. J.; BRONDANI, C.; VIANELLO, R. P. Molecular and bio-chemical characterization of superoxide dismutase (SOD) in upland rice under drought. **Australian Journal of Crop Science**, v. 9, p. 744-753, 2015.
- DOMENICO, M.; LINA, C.; FRANCESCA, B. Sustainable crops for food security: Moringa (*Moringa oleifera* Lam.). **Encyclopedia of Food Security and Sustainability**, v. 1, p. 409-415, 2019.
- DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956.
- ECHER, F. R.; CUSTÓDIO, C. C.; HOSSOMI, S. T.; DOMINATO, J. C.; MACHADO NETO, N. B. Estresse hídrico induzido por manitol em cultivares de algodão. **Ciência Agrônômica**, v. 41, p. 638-645, 2010.
- EDMOND, J. B.; DRAPALA, W. J. The effects of temperature, sand and soil, and acetone on germination of okra seeds. **Proceedings of the American Society For Horticultural Science**, v. 71, p. 428-434, 1958.
- FARHANGI-ABRIZ, S.; GHASSEMI-GOLEZANI, K. Jasmonates: mechanisms and functions in abiotic stress tolerance of plants. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 20, p. 101210, 2019.
- FERRAZ, R. L. S. BARBOSA, M. A.; MAGALHÃES, I. D.; MELO, A. S.; ROCHA, M. S.; COSTA, P. S. Atributos qualitativos de sementes de algodoeiro hidrocondicionadas em soluções de silício. **Científica**, v. 45, p. 85-94, 2017.
- FERRAZ, R. L. S.; COSTA, P. S.; MAGALHÃES, I. D.; VIÉGAS, P. R. A.; DANTAS NETO, J.; MELO, A. S. Physiological adjustments, yield increase and fiber quality of 'BRS Rubi' naturally colored cotton under silicon doses. **Revista Caatinga**, v. 35, p. 371-381, 2022.
- FERREIRA, D. T. R. G. SILVA, V. M.; SILVA, I. C.; ARAUJO NETO, J. C.; SOUZA, R. C.; FERREIRA, V. M. Germinação de três Euphorbiaceae influenciada pela luz e níveis de palhada. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 11, p. 215-222, 2017.
- GALGAYE, G. G.; BESHIR, H. M.; RORO, A. G. Physiological responses of Moringa (*Moringa stenopetala* L.) seedlings to drought stress under greenhouse conditions, Southern Ethiopia. **Asian Journal of Biotechnology**, v. 12, p. 97-107, 2020.

- GARCIA, T. B.; SOARES, A. A.; COSTA, J. H.; COSTA, H. P. S.; NETO, J. X. S.; ROCHA-BEZERRA, L. C. B.; SILVA, F. D. A.; ARANTES, M. R.; SOUSA, D. O. B.; VASCONCELOS, I. M.; OLIVEIRA, J. T. A. Gene expression and spatiotemporal localization of antifungal chitinbinding proteins during *Moringa oleifera* seed development and germination. **Planta**, v. 249, p. 1503-1519, 2019.
- GE, Y.; HAWKESFORD, M. J.; ROSOLEM, C. A.; MOONEY, S. J.; ASHTON, R. W.; EVANS, J.; WHALLEY, W. R. Multiple abiotic stress, nitrate availability and the growth of wheat. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 171-184, 2019.
- GHASSEMI-GOLEZANI, K.; FARHANGI-ABRIZ, S. Biochar alleviates fluoride toxicity and oxidative stress in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seedlings. **Chemosphere**, v. 223, p. 406-415, 2019.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p. 309-314, 1977.
- GONG, G.; DONGOL, R.; YATONGCHAI, C.; WREN, A. W.; SUNDARAM, S. K.; MELLOTT, N. P. Recycling of waste amber glass and porcine bone into fast sintered and high strength glass foams. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4534-4539, 2016.
- GUIMARÃES, M. A.; DIAS, D. C. F. S.; LOUREIRO, M. E. Hidratação de sementes. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 2, p. 31-39, 2008.
- HAIR Jr., J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 688 p.
- HAVIR, E. A.; McHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant Physiology**, v. 84, p. 450-455, 1987.
- HEKMAT, S.; MORGAN, K.; SOLTANI, M.; GOUGH, R. Sensory evaluation of locally-grown fruit purees and inulin fibre on probiotic yogurt in Mwanza, Tanzania and the microbial analysis of probiotic yogurt fortified with *Moringa oleifera*. **Journal of Health, Population and Nutrition**, v. 33, p. 60-67, 2015.
- HÖLL, J.; LINDNER, S.; WALTER, H.; JOSHI, D.; POSCHET, G.; PFLEGER, S.; ZIEGLER, T.; HELL, R.; BOGS, J.; RAUSCH, T. Impact of pulsed UV-B stress exposure on plant performance: How recovery periods stimulate secondary metabolism while reducing adaptive growth attenuation. **Plant, Cell & Environment**, v. 42, p. 801-814, 2019.
- HUSSAIN, A.; RIZWAN, M.; ALI, Q.; ALI, S. Seed priming with silicon nanoparticles improved the biomass and yield while reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat grains. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 7579-7588, 2019.
- JALIL, S. U.; ANSARI, M. I. Nanoparticles and abiotic stress tolerance in plants: synthesis, action, and signaling mechanisms. In: KHAN, M. I. R.; REDDY, P. S.; FERRANTE, A.; KHAN, N. A. (eds.). **Plant signaling molecules: role and regulation under stressful environments**. 2019. 549-561 p.
- JAVAID, T.; FAROOQ, M. A.; AKHTAR, J.; SAQIB, Z. A.; ANWAR-UL-HAQ, M. Silicon nutrition improves growth of salt-stressed wheat by modulating flows and partitioning of Na⁺, Cl⁻ and mineral ions. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 141, p. 291-299, 2019.
- JUNG, J. H.; KIM, H. Y.; KIM, H. S.; JUNG, S. H. Transcriptome analysis of *Panax ginseng* response to high light stress. **Journal of Ginseng Research**, v. 44, p. 312-320, 2020.
- KAISER, H.F. The Varimax Criterion for Analytic Rotation in Factor Analysis. **Psychometrika**, v. 23, p. 187-200, 1958.
- KAMI, C.; LORRAIN, S.; HORNITSCHKE, P.; FANKHAUSER, C. Light-regulated plant growth and development. **Current Topics in Developmental Biology**, v. 91, p. 29-66, 2010.
- KARTHICKEYAN, V. Effect of cetane enhancer on *Moringa oleifera* biodiesel in a thermal coated direct injection diesel engine. **Fuel**, v. 235, p. 538-550, 2019.
- KHAN, M. I. R.; ASHFAQUE, F.; CHHILLAR, H.; IRFAN, M.; KHAN, N. A. The intricacy of silicon, plant growth regulators and other signaling molecules for abiotic stress tolerance: An

- entrancing crosstalk between stress alleviators. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 162, p. 36-47, 2021.
- KHAN, Z.; UPADHYAYA, H. Impact of nanoparticles on abiotic stress responses in plants: an overview. In: TRIPATHI, D. K.; AHMAD, P.; SHARMA, S.; CHAUHAN, D. K.; DUBEY, N. K. (eds.). **Nanomaterials in plants, algae and microorganisms: concepts and controversies**. Academic Press: Amsterdã, 2019. 305-322 p.
- KHOLIF, A. E.; GOUDA, G. A.; ANELE, U. Y.; GALYEAN, M. L. Extract of *Moringa oleifera* leaves improves feed utilization of lactating Nubian goats. **Small Ruminant Research**, v. 158, p. 69-75, 2018.
- KONG, Y.; SCHIESTEL, K.; ZHENG, Y. Pure blue light effects on growth and morphology are slightly changed by adding low-level UVA or far-red light: a comparison with red light in four microgreen species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 157, p. 58-68, 2019.
- KONG, Y.; STASIAK, M.; DIXON, M. A.; ZHENG, Y. Blue light associated with low phytochrome activity can promote elongation growth as shade-avoidance response: a comparison with red light in four bedding plant species. **Environmental and Experimental Botany**, v. 155, p. 345-359, 2018.
- KONO, M.; KAWAGUCHI, H.; MIZUSAWA, N.; YAMORI, W.; SUZUKI, Y.; TERASHIMA, I. Far-red light accelerates photosynthesis in the low-light phases of fluctuating light. **Plant & Cell Physiology**, v. 61, p. 192-202, 2020.
- KUCZYŃSKA, A.; CARDENIA, V.; OGRODOWICZ, P.; KEMPA, M.; RODRIGUEZ-ESTRADA, M. T.; MIKOŁAJCZAK, K. Effects of multiple abiotic stresses on lipids and sterols profile in barley leaves (*Hordeum vulgare* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 141, p. 215-224, 2019.
- LABOURIAU, L. G.; VALADARES, M. B. On the germination of seeds of *Calotropis procera*. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 48, p. 174-186, 1976.
- LIANG, S.; GAO, X.; WANG, Y.; ZHANG, H.; YIN, K.; CHEN, S.; ZHANG, M.; ZHAO, R. Phytochrome-interacting factors regulate seedling growth through ABA signaling. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 526, p. 1100-1105, 2020.
- LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, v. 1, p. F4.3.1-F4.3.8, 2001.
- LIU, L.; LIN, N.; LIU, X.; YANG, S.; WANG, W.; WAN, X. From chloroplast biogenesis to chlorophyll accumulation: the interplay of light and hormones on gene expression in *Camellia sinensis* cv. shuchazao leaves. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. e256, 2020.
- LIU, X.; MA, D.; ZHANG, Z.; WANG, S.; DU, S.; DENG, X.; YIN, L. Plant lipid remodeling in response to abiotic stresses. **Environmental and Experimental Botany**, v. 165, p. 174-184, 2019.
- LOZANO-MONTAÑA, P. A.; SARMIENTO, F.; MEJÍA-SEQUERA, L. M.; ÁLVAREZ-FLÓREZ, F.; MELGAREJO, L. M. Physiological, biochemical and transcriptional responses of *Passiflora edulis* Sims f. *edulis* under progressive drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 275, p. e109655, 2021.
- LV, B.; YAN, Z.; TIAN, H.; ZHANG, X.; DING, Z. Local auxin biosynthesis mediates plant growth and development. **Trends in Plant Science**, v. 24, p. 6-9, 2019.
- MACÁRIO, A. P. S.; FERRAZ, R. L. S.; COSTA, P. S.; BRITO NETO, J. F.; MELO, A. S.; DANTAS NETO, J. Allometric models for estimating *Moringa oleifera* leaflets area. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e005220, 2020.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evolution for seedling and vigour. **Crop Science**, v. 2, p. 176-177, 1962.

- MAJEED, A.; MUHAMMAD, Z.; ISLAM, S.; AHMAD, H. Salinity imposed stress on principal cereal crops and employing seed priming as a sustainable management approach. **Acta Ecologica Sinica**, v. 39, p. 280-283, 2019.
- MARTINS, A. C.; LARRÉ, C. F.; BORTOLINI, F.; BORELLA, J.; EICHHOLZ, R.; DELIAS, D.; AMARANTE, L. Tolerância ao déficit hídrico: adaptação diferencial entre espécies forrageiras. **Iheringia**, v. 73, p. 228-239, 2018.
- MATSUO, S.; NANYA, K.; IMANISHI, S.; HONDA, I.; GOTO, E. Effects of blue and red lights on gibberellin metabolism in tomato seedlings. **The Horticulture Journal**, v. 88, p. 76-82, 2019.
- MELO, A. S.; MELO, Y. L.; LACERDA, C. F.; VIÉGAS, P. R. A.; FERRAZ, R. L. S.; GHEYI, H. R. Water restriction in cowpea plants [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.]: metabolic changes and tolerance induction. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 190-197, 2022.
- MIAO, Y.; CHEN, Q.; QU, M.; GAO, L.; HOU, L. Blue light alleviates 'red light syndrome' by regulating chloroplast ultrastructure, photosynthetic traits and nutrient accumulation in cucumber plants. **Scientia Horticulturae**, v. 257, p. e108680, 2019.
- MICKENS, M. A.; SKOOG, E. J.; REESE, L. E.; BARNWELL, P. L.; SPENCER, L. E.; MASSA, G. D.; WHEELER, R. M. A strategic approach for investigating light recipes for 'Outredgeous' red Romaine lettuce using white and monochromatic LEDs. **Life Sciences in Space Research**, v. 19, p. 53-62, 2018.
- MICKENS, M. A.; TORRALBA, M.; ROBINSON, S. A.; SPENCER, L. E.; ROMEYN, M. W.; MASSA, G. D.; WHEELER, R. M. Growth of red pak choi under red and blue, supplemented white, and artificial sunlight provided by LEDs. **Scientia Horticulturae**, v. 245, p. 200-209, 2019.
- MITTLER, R. ROS are good. **Trends in plant science**, v. 22, p. 11-19, 2017.
- MOHAMMED, F.; TEFAY, S. Z.; MABHAUDHI, T.; CHIMONYO, V. G. P.; MODI, A. T. Biochemical response of *Moringa oleifera* to temperature. **Acta Horticulturae**, v. 1306, p. 43-50, 2021.
- MUHL, Q. E.; DU TOIT, E. S.; ROBBERTSE, P. J. Temperature effect on seed germination and seedling growth of *Moringa oleifera* Lam. **Seed Science and Technology**, v. 39, p. 208-213, 2011.
- MUKARRAM, M.; KHAN, M. M. A.; CORPAS, F. J. Silicon nanoparticles elicit an increase in lemongrass (*Cymbopogon flexuosus* (Steud.) Wats) agronomic parameters with a higher essential oil yield. **Journal of Hazardous Materials**, v. 412, p. e125254, 2021.
- MUNIZ, F. R.; CARDOSO, M. das G.; PINHO, É. V. R. V.; VILELA, M. Qualidade fisiológica de sementes de milho, feijão, soja e alface na presença de extrato de tiririca. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 29, p. 195-204, 2007.
- NEFF, M. M. Light-mediated seed germination: connecting phytochrome B to gibberellic acid. **Developmental Cell**, v. 22, p. 687-688, 2012.
- OH, J.; PARK, E.; SONG, K.; BAE, G.; CHOI, G. Phytochrom interacting factor8 inhibits phytochrome A-mediated far-red light responses in Arabidopsis. **The Plant Cell**, v. 32, p. 186-205, 2020.
- OKA, Y.; YAMAMOTO, K. Photoreceptor-mediated plant development. In: ANPO, M.; FUKUDA, H.; WADA, T. (eds.). **Plant factory using artificial light: adapting to environmental disruption and clues to agricultural innovation**. Amsterdam: Elsevier, 2019. 111-117 p.
- OYEYINKA, A. T.; OYEYINKA, S. A. *Moringa oleifera* as a food fortificant: Recent trends and prospects. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 17, p. 127-136, 2018.
- PAIVA, P. M. G.; PONTUAL, E. V.; NAPOLEÃO, T. H.; COELHO, L. C. B. B. Tecidos de *Moringa oleifera* Lam. como fontes de proteínas bioativas: lectinas e inibidores de proteases. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M.

- G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da *Moringa oleifera* Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 201-226 p.
- PÁRAMO-CALDERÓN, D. E.; APARICIO-SAGUILÁN, A.; AGUIRRECRUZ, A.; CARRILLO-AHUMADA, J.; HERNÁNDEZ-URIBE, J. P.; ACEVE-DO-TELLO, S.; TORRUCO-UCO, J. G. Tortilla added with *Moringa oleifera* flour: physicochemical, texture properties and anti-oxidant capacity. **LWT**, v. 100, p. 409-415, 2019.
- PARREIRA, M. C.; CARDOZO, N. P.; GIANCOTTI, P. R. F.; ALVES, P. L. A. S. Germinação de sementes de melão-de-são-caetano sob variação de água, luz e temperatura. **Bioscience Journal**, v. 27, p. 363-370, 2011.
- PARVEEN, S.; RASOOL, F.; AKRAM, M. N.; KHAN, N.; ULLAH, M.; MAHMOOD, S.; RABBANI, G.; MANZOOR, K. Effect of *Moringa olifera* leaves on growth and gut microbiota of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Brazilian Journal of Biology**, v. 84, p. e250916, 2024.
- PEREIRA, F. S. G.; SOBRAL, A. D.; SILVA, A. M. R. B.; ROCHA, M. A. G. *Moringa oleifera*: a promising agricultural crop and of social inclusion for Brazil and semi-arid regions for the production of energetic biomass (biodiesel and briquettes). **Oilseeds & fats Crops and Lipids**, v. 25, p. 1-11, 2018.
- PEREIRA, K. T. O.; SANTOS, B. R. V.; BENEDITO, C. P.; LOPES, E. G.; AQUINO, G. S. M. Germinação e vigor de sementes de *Moringa oleifera* Lam. em diferentes sustratos e temperaturas. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 92-99, 2015.
- POLESI, L. G.; FRAGA, H. P. F.; VIEIRA, L. N.; HERINGER, A. S.; ORNELLAS, T. S.; SANTOS, H. P.; GUERRA, M. P.; PESCADOR, R. Chloroplast ultrastructure and hormone endogenous levels are differently affected under light and dark conditions during in vitro culture of *Guadua chacoensis* (Rojas) Londoño & P. M. Peterson. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 41, p. 10, 2019.
- REZENDE, F. P. F.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S. Aplicação de extratos de folhas e tubérculos de *Cyperus rotundus* L. e de auxinas sintéticas na estaquia caular de *Duranta repens* L. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 15, p. 639-645, 2013.
- RIVAS, R.; OLIVEIRA, M. T.; SANTOS, M. G. Three cycles of water deficit from seed to young plants of *Moringa oleifera* woody species improves stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 63, p. 200-208, 2013.
- RIZWAN, M.; ALI, S.; ALI, B.; ADREES, M.; ARSHAD, M.; HUSSAIN, A.; REHMAN, M. Z.; WARIS, A. A. Zinc and iron oxide nanoparticles improved the plant growth and reduced the oxidative stress and cadmium concentration in wheat. **Chemosphere**, v. 214, p. 269-277, 2019.
- SALEMI, F.; ESFAHANI, M. N.; TRAN, L. S. P. Mechanistic insights into enhanced tolerance of early growth of alfalfa (*Medicago sativa* L.) under low water potential by seed-priming with ascorbic acid or polyethylene glycol solution. **Industrial Crops and Products**, v. 137, p. 436-445, 2019.
- SANT'ANNA, M. C. S.; SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; BERY, C. C. S.; LOUZEIRO, H. C. Biodiesel de Moringa. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M. G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da *Moringa oleifera* Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 145-162 p.
- SANTANA, C. R.; PEREIRA, D. F.; ARAÚJO, N. A. de; CAVALCANTI, E. B.; SILVA, G. F. da. Caracterização físico-química da moringa (*Moringa oleifera* Lam). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 12, p. 55-60, 2010.
- SANTOS, C. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, M. A. L.; PEDROSA, E. M. R. Evapotranspiration and crop coefficients of *Moringa oleifera* under semi-arid conditions in Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 840-845, 2017.

- SANTOS, M. G. M.; SILVA, W. C.; RIBEIRO, P. H. P.; BARRETTO, V. C. M.; ROCHA, E. C.; OLIVEIRA, R. C.; LUZ, J. M. Q.; ARRUDA, A. S. Clonal propagation of *Eucalyptus urophylla* under effect of *Cyperus rotundus* extract and indole-3-acetic acid. **Scientia Plena**, v. 17, p. 1-8, 2021.
- SARKAR, M. M.; MATHUR, P.; ROY, S. Silicon and nano-silicon: new frontiers of biostimulants for plant growth and stress amelioration. In: ETESAMI, H.; EL-RAMADY, H.; PESSARAKLI, M.; AL SAEEDI, A. H.; FUJITA, M.; HOSSAIN, M. A. (eds.). **Silicon and nano-silicon in environmental stress management and crop quality improvement: progress and prospects**. Academic Press: London, 2022. 17-36 p.
- SCARIOT, E.; BONOME, L. T. S.; BITTENCOURT, H. V. H.; LIMA, C. S. M. Extrato aquoso de *Cyperus rotundus* no enraizamento de estacas lenhosas de *Prunus persica* cv. 'Chimarrita'. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 16, p. 195-200, 2017.
- SERAFINI, M. R.; SILVA, G. F.; BERY, C. C. S.; SANTOS, B. S. Usos medicinais e biotecnológicos. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M. G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da *Moringa oleifera* Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 187-200 p.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (Complete Samples). **Biometrika Trust**, v. 52, p. 591-609, 1965.
- SHIBUYA, T.; ENDO, R.; KITAYA, Y.; TSUCHIDA, M. Far-red light interacts with plant density to change photosynthate allocation of cucumber seedlings and their subsequent early growth after transplanting. **Horticultural Science**, v. 55, p. 1433-1437, 2020.
- SILVA, A. E.; FERRAZ, R. L. S.; SILVA, J. P.; COSTA, P. S.; VIEGAS, P. R. A.; BRITO NETO, J. F.; MELO, A. S.; MEIRA, K. S.; SOARES, C. S.; MAGALHÃES, I. D.; MEDEIROS, A. S. Microclimate changes, photomorphogenesis, and water consumption by *Moringa oleifera* cuttings under light spectrum variations and exogenous phytohormones concentrations. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, p. 751-760, 2020.
- SILVA, J. P. V.; SERRA, T. M.; GOSSMANN, M.; WOLF, C. R.; MENEGHETTI, M. R.; MENEGHETTI, S. M. P. *Moringa oleifera* oil: studies of characterization and biodiesel production. **Biomass and Bioenergy**, v. 34, p. 1527-1530, 2010.
- SIMÕES, C. M. O.; SCHENKEL, E. P.; GOSMANN, G.; MELLO, J. C. P.; MENTZ, L. A.; PETROVICK, P. R. **Farmacognosia: da planta ao medicamento**. 5. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2003. 1102 p.
- SINGH, A.; KUMAR, A.; YADAV, S.; SINGH, I. K. Reactive oxygen species-mediated signaling during abiotic stress. **Plant Gene**, v. 18, p. e100173, 2019.
- SINGH, A.; TIWARI, S.; PANDEY, J.; LATA, C.; SINGH, I. K. Role of nanoparticles in crop improvement and abiotic stress management. **Journal of Biotechnology**, v. 337, p. 57-70, 2021.
- SOUSA, A.; SALEH, A. M.; HABEEB, T. H.; HASSAN, Y. M.; ZRIEQ, R.; WADAAN, M. A. M.; HOZZEIN, W. N.; SELIM, S.; MATOS, M.; ABDELGAWAD, H. Silicon dioxide nanoparticles ameliorate the phytotoxic hazards of aluminum in maize grown on acidic soil. **Science of The Total Environment**, v. 693, p. e133636, 2019.
- SOUTO, P. C.; MAIOR JÚNIOR, S. G. S. Origem, botânica e morfologia da *Moringa*. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M. G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da *Moringa oleifera* Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 15-36 p.
- STATSOFT INC. **Statistica: data analysis software system**. version 7, 2004.
- TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SINGH, S.; SRIVASTAVA, P. K.; SINGH, V. P.; SINGH, S.; PRASAD, S. M.; SINGH, P. K.; DUBEY, N. K.; PANDEY, A. C.; CHAUHAN, D. K. Nitric oxide alleviates silver nanoparticles (AgNps)-induced phytotoxicity in *Pisum sativum* seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 110, p. 167-177, 2017.

- VAISHAK, K. P.; YADUKRISHNAN, P.; BAKSHI, S.; KUSHWAHA, A. K.; RAMACHANDRAN, H.; JOB, N.; BABU, D.; DATTA, S. The B-box bridge between light and hormones in plants. **Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology**, v. 191, p. 164-174, 2019.
- VASCONCELOS, M. C.; COSTA, J. C.; SOUSA, J. P. S.; SANTANA, F. V.; SOARES, T. F. S. N.; OLIVEIRA JÚNIOR, L. F. G.; SILVA-MANN, R. Biometric and physiological responses to water restriction in *Moringa oleifera* seedlings. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. 1-8, 2019.
- VIEIRA, A. M. S.; AMBROSIO-UGRI, M. C. B.; NISHI, L.; SILVA, G. F.; BERGAMASCO, R. Potencial nutricional e aplicações da moringa na alimentação humana e animal. In: SILVA, G. F.; SANTANA, M. F. S.; LIMA, A. K. V. O.; BERGAMASCO, R.; PAIVA, P. M. G.; SANT'ANNA, M. C. S.; SERAFINI, M. R.; BERY, C. C. S. (eds.). **Potencialidades da *Moringa oleifera* Lam.** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2018. 162-186 p.
- VILLASEÑOR-BASULTO, D. L.; ASTUDILLO-SÁNCHEZ, P. D.; REAL-OLVERA, J.; BANDALA, E. R. Wastewater treatment using *Moringa oleifera* Lam seeds: a review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 23, p. 151-164, 2018.
- WANG, Y.; BIAN, Z.; PAN, T.; CAO, K.; ZOU, Z. Improvement of tomato salt tolerance by the regulation of photosynthetic performance and antioxidant enzyme capacity under a low red to far-red light ratio. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 167, p. 806-815, 2021.
- WANG, Y.; ZHANG, B.; JIANG, D.; CHEN, G. Silicon improves photosynthetic performance by optimizing thylakoid membrane protein components in rice under drought stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 158, p. 117-124, 2019.
- WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive oxygen species in plant signaling. **Annual review of plant biology**, v. 69, p. 209-236, 2018.
- YAMASHITA, O. M.; GUIMARAES, S. C.; CAVENAGHI, A. L. Germinação das sementes de *Conyza canadensis* e *Conyza bonariensis* em função da qualidade de luz. **Planta Daninha**, v. 29, p. 737-743, 2011.
- YAMORI, W.; HIKOSAKA, K.; WAY, D. A. Temperature response of photosynthesis in C₃, C₄, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynthesis Research**, v. 119, p. 101-117, 2014.
- YAO, W.; ZHOU, B.; ZHANG, X.; ZHAO, K.; CHENG, Z.; JIANG, T. Transcriptome analysis of transcription factor genes under multiple abiotic stresses in *Populus simonii* × *P.nigra*. **Gene**, v. 707, p. 189-197, 2019.
- ZHU, Y.; YIN, J.; LIANG, Y.; LIU, J.; JIA, J.; HUO, H.; WU, Z.; YANG, R.; GONG, H. Transcriptomic dynamics provide an insight into the mechanism for silicon-mediated alleviation of salt stress in cucumber plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 174, p. 245-254, 2019.