



JÉSSICA BATISTA RIBEIRO

**INDUÇÃO DA TOLERÂNCIA A ESTRESSES ABIÓTICOS NA
GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE ARROZ DE TERRAS
ALTAS COM USO DE MOLÉCULAS SINALIZADORAS**

**LAVRAS - MG
2022**

JÉSSICA BATISTA RIBEIRO

**INDUÇÃO DA TOLERÂNCIA A ESTRESSES ABIÓTICOS NA GERMINAÇÃO DE
SEMENTES DE ARROZ DE TERRAS ALTAS COM USO DE MOLÉCULAS
SINALIZADORAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

Prof^ª. Dra. Heloisa Oliveira dos Santos
Orientadora

Prof^ª. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

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

Ribeiro, Jéssica Batista.

Indução da tolerância a estresses abióticos na germinação de
sementes de arroz de terras altas com uso de moléculas
sinalizadoras / Jéssica Batista Ribeiro. - 2022.

75 p.

Orientador(a): Heloísa Oliveira dos Santos.

Coorientador(a): Flávia Barbosa Silva Botelho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2022.

Bibliografia.

1. *Oryza sativa* L. 2. Qualidade fisiológica. 3. Estresse
oxidativo. I. Santos, Heloísa Oliveira dos. II. Botelho, Flávia
Barbosa Silva. III. Título.

JÉSSICA BATISTA RIBEIRO

**INDUÇÃO DA TOLERÂNCIA A ESTRESSES ABIÓTICOS NA GERMINAÇÃO DE
SEMENTES DE ARROZ DE TERRAS ALTAS COM USO DE MOLÉCULAS
SINALIZADORAS
INDUCTION OF TOLERANCE TO ABIOTIC STRESS IN THE GERMINATION OF
UPLAND RICE SEEDS WITH THE USE OF SIGNALING MOLECULES**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 14 de fevereiro de 2022.

Profa. Dra. Heloísa Oliveira dos Santos	UFLA
Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho	UFLA
Profa. Dra. Édila Vilela de Resende Von Pinho	UFLA
Profa. Dra. Renata Silva Mann	UFS

Profa. Dra. Heloisa Oliveira dos Santos
Orientadora

Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho
Coorientadora

**LAVRAS-MG
2022**

*A Deus, meu alicerce, por guiar meus caminhos e me conceder tantas bênçãos.
Aos meus pais Ademilton (sempre presente) e Joana Darc,
pelo amor, força e exemplo de responsabilidade, dedicação, humildade e dignidade.
Ao meu esposo Itamar Oliveira e minha filha Ester pelo apoio e amor constante, por
entenderem minha ausência.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder a vida, pela sabedoria, por sempre me iluminar e guiar meus caminhos, pelas oportunidades ao longo da vida, por me amparar nos momentos de angústia, pela proteção e por colocar em meus caminhos pessoas maravilhosas.

A minha mãe, Joana Darc, por todo apoio, dedicação, por se fazer presente, ser minha fortaleza, por tornar os momentos difíceis menos dolorosos e, principalmente pelas orações.

Ao meu pai, Ademilton, pelos conselhos e amizade. Minha maior saudade!

Ao meu esposo, Itamar, pelo amor, carinho, amizade, companheirismo e incentivo. Por se manter presente, sobretudo nos momentos de estresse e ansiedade. Gratidão a Deus por ter colocado você em meu caminho.

Ao meu amor incondicional, minha filha Ester, pelo carinho e amor. Você é minha fonte de inspiração e força para continuar a minha caminhada.

Aos familiares, em especial, agradeço, ao meu irmão Marcus e cunhada Caroline pelo apoio constante e conselhos.

As minhas tias por sempre me sustentarem em oração. Aos meus padrinhos, Hipólito e Cida, por se fazerem presentes, me acolherem como filha, por ser exemplo de determinação e fé, e por sempre se lembrarem de mim em suas orações.

Aos amigos, em especial, Anna Carolina, Marília e Maria Elisângela por todo apoio e por me acompanharem ao longo do mestrado. Por me amparem nos momentos que precisei e por comemorarem comigo cada conquista.

A Universidade Federal de Lavras (UFLA) pelas oportunidades de aprendizado e ensinamentos dessa renomada instituição de ensino.

Aos docentes do programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia por todo conhecimento compartilhado. Vocês não são apenas formadores de profissionais, mas de opiniões e caráter.

A minha orientadora, Dra. Heloisa Oliveira dos Santos, pelo conhecimento transmitido, conselhos, confiança, paciência e, por ser para mim exemplo de pessoa humana e orientadora. Em especial, agradeço por sua amizade e por ter sido fonte de apoio nos momentos que mais precisei.

Ao programa de Pesquisa e Melhoramento de Arroz- Melhor Arroz UFLA pela parceria e por ceder às sementes de modo que esse trabalho fosse possível. Assim, estendo meus agradecimentos a professora Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho pela coorientação na realização deste trabalho.

Aos amigos e companheiros do LCPS, Isadora, Marcinho, Gisele, Anna Rakhel, Antônio Neto e Anna Carolina, pela ajuda durante a condução do experimento. Agradeço aos funcionários do laboratório Rose, Jaque, Rafa, Geraldo e Vivi pelas orientações e por tornarem esse trabalho possível.

Aos meus coorientados de TCC, Humberto, Anna Rakhel e André, pela amizade, ajudam apoio, experiência e aprendizado.

Aos membros da banca examinadora pelas contribuições para este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo apoio financeiro.

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

Aos membros do Núcleo de Estudo em Sementes (NESem), pelo aprendizado e crescimento pessoal e profissional.

A todos que de alguma forma contribuíram e torceram por mim.

MUITO OBRIGADO.

*“Fazer o que você gosta é liberdade.
Gostar do que você faz é felicidade.”
(Frank Tiger)*

RESUMO GERAL

O arroz é importante alimento na dieta da população mundial, por ser uma excelente fonte de energia, vitaminas e de proteínas essenciais ao homem. Apesar da importância a produção não tem acompanhado a demanda, sendo necessário desenvolver novas cultivares tolerantes para o plantio sob condições de déficit hídrico e altas temperatura. O arroz de terras altas é bastante vulnerável aos estresses a seca e temperatura alta. Sob essas condições ocorre redução na altura da planta, decréscimo do número de perfilhos, redução do número de panículas, redução do acúmulo de biomassa e da produção dos grãos, atraso do florescimento, esterilidade das espiguetas, redução do número de grãos e por consequência redução da produtividade. Além disso, ocorre um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), que pode levar ao estresse oxidativo e danos celulares, resultando na deterioração. Contudo, as células possuem um sistema enzimático antioxidante de defesa que atua eliminando as EROs e garantindo a sobrevivência das plantas. A semente é o principal veículo de tecnologia gerada, por isso o uso de sementes de alta qualidade fisiológica, com germinação rápida e que resulte em um estande uniforme e plantas vigorosas, que seja tolerante às condições de estresses têm grande importância para a cultura, a fim de diminuir o tempo de exposição da semente as intempéries. O condicionamento fisiológico atrelado ao uso de moléculas sinalizadoras é uma alternativa para aumentar o vigor de plantas e promover um estabelecimento de estande rápido e uniforme em campo. Esta técnica traz como vantagens o aumento da velocidade, uniformidade de emergência de plântulas e a sinalização de rotas de resposta ao estresse. Portanto, a pesquisa foi realizada a fim de avaliar o efeito do condicionamento fisiológico e de moléculas sinalizadoras em sementes de arroz de terras altas, submetidas às diferentes condições de germinação, por meio de análises fisiológicas associadas à atividade de enzimas do sistema antioxidante, peroxidação lipídica e peróxido de hidrogênio.

Palavras-chave: *Oryza sativa* L. Qualidade fisiológica. Condicionamento fisiológico.

Tolerância.

ABSTRACT

Rice is an important food in the diet of the world population, as it is an excellent source of energy, vitamins and essential proteins for man. Despite the importance of production not keeping up with demand, it is necessary to develop new tolerant cultivars for planting under conditions of deficit and high temperatures. Upland rice is vulnerable to drought and high temperature stresses. Under these reduction reduction in plant height, decrease in profile reduction number, reduction number conditions, reduction of biomass accumulation and grain yield, flowering delay, spikelet sterility, reduction of grain reduction number and by reduced productivity. In addition, there is an increase in the production of reactive oxygen species (ROS), which can lead to the emergence of oxidative springs, giving rise to oxidative activity. ROS, cells, cells, enzymatic defense system that works like ROS and has a patent to eliminate one of the plants. The seed the main manufacturing vehicle to manufacture high quality technology, is a uniform use of high quality plants, which is a uniform use of high quality plants, which is a uniform use for the crop, and results in a great degree of importance for the culture, and have as a result a great importance for the culture in order to reduce the time of exposure of the seed to the bad weather. Physical conditioning in the use of flags is an alternative to establishing rapid and uniform growth in the field. This technique has the advantages of increasing speed, uniformity of plant emergence and signaling stress response scales. Therefore, research was carried out in order to assess physical conditioning and conditioning modification, changes amidst changes in rice conditions suitable for antioxidant enzyme activity, by lipid oxidation and hydrogen peroxide.

Key-words: *Oryza sativa* L. Physiological quality. Priming. Tolerance

SUMÁRIO

	CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL	12
1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	Aspectos gerais e a importância da cultura do arroz	14
2.2	Estresses abióticos na cultura do arroz	15
2.3	Qualidade fisiológica de sementes	15
2.4	Condicionamento fisiológico.....	16
	REFERÊNCIAS	20
	CAPÍTULO 2 FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE SEMENTES DE ARROZ SUBMETIDAS AO CONDICIONAMENTO FISIOLÓGICO.....	30
1	INTRODUÇÃO.....	32
2	MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	66

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1 INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.), considerado um dos principais alimentos no mundo, é uma excelente fonte de energia, vitaminas e proteínas, sendo uma importante fonte de combate à fome e à desnutrição. Este cereal está presente na dieta de mais de 50% da população mundial, principalmente em países de menor renda (SNEYD, 2016).

Apesar da sua importante relevância no cenário mundial, a produção não tem acompanhado o consumo. No Brasil, estima-se colher cerca de 11,4 milhões de toneladas de arroz na safra 2021/2022, enquanto o consumo interno e exportações deverá atingir 12,4 milhões de toneladas em 2021/2022. Assim, a importação projetada para o final do período é de um milhão de toneladas (CONAB, 2021).

Estresses abióticos tais como seca, salinidade, temperaturas extremas e presença de metais pesados, são as principais causas de perdas de produtividade de sementes em todo o mundo. A resposta a estresses abióticos envolve interações complexas entre diversas rotas metabólicas, em diferentes estádios de desenvolvimento e influenciam substancialmente no desenvolvimento de plantas. Alguns dos principais aspectos do neste processo incluem desenvolvimento de sementes, sua germinação e sobrevivência das plantas em condições desfavoráveis. A germinação das sementes é a etapa mais crucial desde processo, uma vez que garante a sobrevivência da maioria das espécies cultivadas. Para garantir a sobrevivência, as plantas desenvolveram mecanismos que permitem que a germinação das sementes seja suspensa sob condições de estresse, e depois retomada quando as condições são favoráveis (DASZKOWSKA-GOLEC, 2011), como a quiescência e dormência.

Sendo uma importante forma de manutenção da variabilidade genética, as sementes são a principal fonte de transferência de qualidade e tecnologias, para o campo entram como um importante meio de melhora da adaptação a estresses bióticos ou abióticos, principalmente no início do desenvolvimento, ao qual sementes mais vigorosas apresentam melhor estabilidade e uniformidade de germinação do estande (LAWLOR; CORNIC, 2002). As condições ambientais tem grande influência sobre a qualidade das sementes, sendo a principal causa de decréscimo nesta quando não se encontram em equilíbrio (FARIAS et al., 2006)

O condicionamento fisiológico de sementes é uma técnica que consiste na embebição controlada de sementes o processo é interrompido antes da protrusão radicular acontecer. Na

técnica se faz uso de agentes diversos, desde água a moléculas como polietilenoglicol ou nitroprussiato de sódio, que além de auxiliar na uniformização da germinação, trazer benefícios como a resistência da semente e da planta aos estresses abióticos. Nesse contexto, o condicionamento fisiológico como é vantajoso quanto à tolerância, por parte da planta, as condições desfavoráveis no campo, reduzindo os efeitos dos estresses abióticos sobre a produção (BONOME et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; SILVA et al., 2018; ZHENG et al., 2016) et al., 2018;). Como os processos iniciais da germinação são ativados ainda em condições ótimas, a técnica fornece uma vantagem às sementes, quando estas forem expostas às condições adversas de déficit hídrico e temperaturas extremas ou outros tipos de estresse.

Estudos ligados à técnica de condicionamento fisiológico com o uso de moléculas que melhoram a tolerância ao estresse e a adaptação de sementes tratadas a condições de mudanças nas condições ambientais são cada vez mais necessários para reverter os efeitos negativos de ambientes desfavoráveis e conseqüentemente, as perdas na produção das culturas. Várias moléculas naturais e produtos químicos sintéticos têm sido trabalhados com o intuito de proteger plantas. Dentre estes compostos podem ser citados a melatonina (hormônio produzido por plantas e animais), ácido indolacético (AIA) (fitohormônio), óxido nítrico, peróxido de hidrogênio e quitosana (PIRES et al., 2016). A ação destes produtos contra estresses abióticos parece estar associada aos mecanismos de defesa, ou seja, atuam como moléculas sinalizadoras da indução de rotas de proteção oxidativa. Além de sua proteção contra o efeito do estresse, algumas dessas moléculas, a exemplo da melatonina e do ácido indolacético, também podem estimular o crescimento e desenvolvimento das plântulas e plantas

A maioria dos estresses abióticos, incluindo seca, salinidade, temperatura extrema, luz alta e poluentes, como metais pesados ou pesticidas, resulta em estresse oxidativo em virtude do aumento de espécies reativas de oxigênio (EROs) a níveis superior a capacidade de eliminá-lo ou neutralizá-los (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020). Os danos causados pelo estresse oxidativo são limitados pela indução da expressão de genes relacionados à resposta a esses, tais como a redução da peroxidação lipídica e dos níveis de H₂O₂ (REITER et al., 2015; ZHANG et al., 2014a). O estresse oxidativo atrasa o crescimento das plantas e diminui seu rendimento. Em casos severos, pode desencadear a morte celular programada (PCD), resultando em perdas ainda maiores na produção (GADJEV; STONE; GECHEV, 2008; PETROV et al., 2015).

Diante do exposto, é importante avaliar os benefícios do condicionamento fisiológico e a utilização de moléculas sinalizadoras em relação ao aumento da tolerância às diferentes condições de estresse abióticos durante os processos de germinação de sementes e

desenvolvimento de plântulas de arroz. Além disso, por meio da pesquisa proposta foi possível entender os aspectos fisiológicos e bioquímicos envolvidos nos processos de condicionamento fisiológico e uso de moléculas sinalizadoras relacionadas a estresse por restrição hídrica e temperatura alta.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aspectos gerais e a importância da cultura do arroz

Com o constante crescimento demográfico mundial, aumenta também a demanda por maior produção de alimentos. As projeções da ONU para 2050, é que a população mundial atinja 9,7 bilhões de habitantes e 11,2 bilhões em 2100 (ONU, 2019). Esse exponencial crescimento populacional atrelado a impossibilidade de classes mais pobres terem acesso aos alimentos básicos necessários para uma dieta saudável e balanceada faz crescer a preocupação com a insegurança alimentar no mundo. Dessa forma, o uso de alimentos ricos nutricionalmente é uma importante ferramenta no controle da insegurança alimentar.

Neste cenário, o arroz (*Oryza sativa* L.) é considerado uma das culturas mais importantes para humanidade por ser o componente principal na dieta de mais da metade da população (JUNG; AN; RONALD, 2008). A espécie é uma gramínea e a mais cultivada do gênero *Oryza*, tendo como centro de origem o sudeste asiático. É uma excelente fonte de energia, devida à alta concentração de amido, fornecendo também proteínas, vitaminas, minerais e fibras (WALTER; MARCHEZAN; AVILA, 2008).

O arroz tem alto potencial de aumento na produção, podendo ser o principal produto para combater a fome no mundo. Tem importância destacada principalmente em países em desenvolvimento, tais como o Brasil, com papel estratégico em níveis econômico e social (SOSBAI, 2018).

Apesar da grande importância, a produção mundial de arroz não vem acompanhando o aumento do consumo. Segundo dados do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) (CHILDS et al., 2021) a produção mundial de arroz beneficiado ficará em torno de 510,78 milhões de toneladas na safra 2021/2022, enquanto o consumo será de 510,91 milhões de toneladas. No caso do Brasil, estima-se colher cerca de 11,4 milhões de toneladas de arroz na safra 2021/2022, enquanto o consumo interno e exportações deverá atingir 12,4 milhões de toneladas em 2021/2022. Assim, a importação projetada para o final do período é de um milhão de toneladas (CONAB, 2021).

Ao longo dos anos, desde sua domesticação o arroz vem sendo cultivado nos mais diversos agroecossistemas. Características morfológicas, como a presença do aerênquima, possibilita que o arroz seja cultivado em solos com condições anaeróbicas, ampliando a possibilidade de explorar áreas com seu cultivo.

No Brasil, o arroz é cultivado em dois sistemas de produção, um que é realizado em campos inundados em parte ou em todo o ciclo de produção, chamado de arroz irrigado ou de várzeas, e um ao qual o plantio é realizado em campos nivelados ou inclinados, sem construção de taludes, podendo ser aplicados o sistema de sequeiro tradicional ou sequeiro sob irrigação suplementar, que seria o arroz de sequeiro ou terras altas (MORAIS et al., 2004). No País, é predominante o cultivo de arroz irrigado, sendo a região sul, mais especificamente o estado do Rio Grande do Sul, com 71,0% da produção nacional, os maiores produtores (IBGE, 2021).

Já o arroz de terras altas tem uma especial participação na dinâmica da agricultura brasileira, utilizado como cultura pioneira na exploração de novas áreas agrícolas, sendo posteriormente substituído por outra cultura de maior valor após um ou dois anos de cultivo (PINHEIRO; CASTRO; GUIMARÃES, 2006). Vale destacar que esta atividade era considerada de baixo custo, alto risco climático e baixo retorno financeiro, o que desestimulou o seu avanço. Atualmente, a cultura tem sido mais vista como desbravadora, sendo usada para recuperação de áreas degradadas ou preparar o solo para culturas posteriores como soja e milho.

O crescente aumento da população e conseqüente aumento da demanda pela produção de alimentos vem ganhando força, porém, em virtude das mudanças climáticas e respeitando os pilares da sustentabilidade, este aumento deve ser feito sem que ocorra a expansão de áreas. Por isso, estudos de manejo, preparo e fertilidade do solo, associados ao desenvolvimento de materiais com maior tolerância a estresse e produtividade é essencial para suprir a necessidade populacional.

2.2 Estresses abióticos na cultura do arroz

2.3 Qualidade fisiológica de sementes

Em qualquer sistema de produção, a semente é um importante veículo de tecnologia e também uma importante fonte de dispersão de pragas e doenças. Dessa forma sua qualidade é um fator determinante para o estabelecimento de um estande uniforme e também para reduzir o risco de infecção por patógenos de grandes áreas durante a emergência das plântulas.

O termo qualidade de sementes representa o somatório dos atributos da qualidade genética, física, fisiológica e sanitária que afetam a capacidade das sementes de gerar plantas de alta produtividade, os quais podem ser afetados durante todo o processo produtivo da semente, desde a sua formação no campo até o armazenamento (MARCOS-FILHO, 2015). A qualidade física está relacionada a aspectos físicos da semente, como danos mecânicos e presença de contaminantes (sementes ou impurezas inertes). A genética está ligada identidade genética, ou seja, a pureza varietal e ao potencial da cultivar, como resistência a estresses e produtividade. A qualidade sanitária, representa a presença ou não de patógenos na superfície da semente, acompanhando lote (MARCOS-FILHO, 2015), localizando-se em materiais inertes ou como estruturas de resistência ou no interior da sementes (DHINGRA, 1985).

A qualidade fisiológica está relacionada às características como o tempo em que a semente permanece viável (viabilidade) em condições ideais de armazenamento (longevidade); sua capacidade de desenvolver e formar uma plântula saudável (germinação) em condições ideais; e a soma dos atributos que lhe conferem o potencial de germinar, emergir e resultar rapidamente em plântulas normais em condições adversas (vigor) (MARCOS-FILHO, 2015).

Para que o agricultor obtenha sucesso no cultivo da lavoura de arroz, é necessário o uso de sementes de boa qualidade, que proporcione uma germinação uniforme, plantas vigorosas e consequentemente melhores índices de produtividade. Dessa forma, o produtor que objetiva o estabelecimento de campos para produção de sementes de arroz, deve atentar, dentre outras coisas, a escolha da espécie e a cultivar adaptada a região, verificar as condições climáticas da região, controle de plantas daninhas, patógenos e insetos, verificar o isolamento da área, efetuar a operação de purificação e tomar cuidados com a contaminação na colheita (CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, 2000; REED; BRADFORD; KHANDAY, 2022).

2.4 Condicionamento fisiológico

O condicionamento fisiológico ou *priming* consiste em uma técnica que permite a hidratação controlada de sementes de maneira a permitir a ocorrência das fases I e II da embebição, sem ocorrer o alongamento celular e consequente protrusão radicular (fase III) (BATISTA et al., 2018; BONOME et al., 2017; RIBEIRO et al., 2019), sendo considerada uma técnica eficaz que permite a melhoria da qualidade de sementes (PAPARELLA et al., 2015) e traz como benefícios, uniformidade de germinação de sementes e o estabelecimento plântulas,

além de promover a tolerância das sementes a condições ambientais adversas (GUIMARÃES, M.A.; GUIMARÃES, A.; SANTANA, T.A.; SILVA, E.V.; ZENZEN, I.; LOUREIRO, 2008).

A técnica de condicionamento fisiológico depende de seus agentes primários utilizados. Por exemplo, no hidrocondicionamento as sementes são embebidas por imersão direta em água em condições ótimas de temperatura; no matricondicionamento, as sementes são misturadas em matriz sólida (orgânico ou inorgânico), permitindo o controle da entrada de água (PAPARELLA et al., 2015) e no osmocondicionamento, em que a entrada de água é limitada pela presença de agentes de baixo potencial hídrico como NaCl, KNO₃, MgSO₄ e polietilenoglicol (PEG) (BHANUPRAKASH, K.; YOGESHA, 2016).

A absorção de água é realizada de maneira controlada, visando que o potencial hídrico interno das sementes se equilibre com o da solução (ALMEIDA et al., 2016; MARCOS-FILHO, 2015). Após isso, as sementes podem ser secas até a mesma umidade observada antes do início do processo, possibilitando o armazenamento por um tempo determinado até que a semeadura seja realizada (WOJTYLA et al., 2016).

O sucesso do processo é condicionado a fatores que devem ser manuseados cuidadosamente, dependendo da espécie a ser trabalhada. Assim, temperatura, luz, concentração da solução, duração do tratamento e soluto a serem usados devem ser cuidadosamente testados para cada espécie (OLIVEIRA, 2016). Ainda é relatada interferência das características do lote, que são afetadas por condições do ambiente em que as sementes foram produzidas (CARDOSO et al., 2015).

O priming tem sido aplicado em diversas espécies para aumentar seu potencial de germinação em condições de estresses abióticos como altas temperaturas, concentração salina, déficit hídrico e presença de metais pesados (BATISTA et al., 2018; BONOME et al., 2017; PEREIRA et al., 2018; RIBEIRO et al., 2019; SABERALI; MORADI, 2019). A exemplo, em sementes de arroz, Li; Zhang (2012) observaram maior tolerância à seca em plântulas de arroz, quando submetidas à técnica de osmocondicionamento, utilizando polietilenoglicol (PEG) e ácido salicílico (SA). Para trigo Nawaz et al. (2013) verificaram maior germinação e tolerância a seca. A maior resistência ao estresse salino também foi relatada, tal como citado para tomate (PRADHAN et al., 2014), pimenta (ALLOUI et al., 2014) e soja (MILADINOV et al., 2015). (OLIVEIRA et al., 2021) verificaram menor porcentagem de sementes dormentes e maior germinação, vigor e desenvolvimento de plantas de *Urochloa brizantha* condicionadas com nitroprussiato de sódio.

O condicionamento fisiológico tende a ser a técnica mais vantajosa pela sua simplicidade, por ser menos onerosa e não necessitar de reagentes e equipamentos sofisticados para sua execução (ARAÚJO et al., 2011). Em alguns tem sido observado que a utilização de água com diferentes cargas, nitroprussiato de sódio (SNP), fitomelatonina, ácido indolacético (AIA), quitosana e peróxido de hidrogênio possuem resultados positivos na técnica de condicionamento fisiológico (PIRES et al., 2016).

O SNP é um composto químico de fórmula $\text{Na}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ que fornece óxido nítrico (ON). A aplicação de doadores de ON agem no aumento e na rapidez da germinação de sementes (ATAÍDE et al., 2015; KAISER et al., 2016; PIRES et al., 2016), bem como no aumento da atividade de enzimas do sistema antioxidante (SILVA et al., 2019). O óxido nítrico é capaz de reduzir os efeitos do envelhecimento das sementes armazenadas (PEREIRA, 2010) e aumenta a tolerância da semente a diversos estresses abióticos, como estresse hídrico, salino e por metais pesados (KAISER et al., 2016; PIRES et al., 2016; SILVA et al., 2015).

A quitosana é um biopolímero, atóxico e biodegradável, obtido pela a desacetilação da quitina das cascas de camarões e crustáceos (LIMA et al., 2021). Nas plantas, o uso desse biopolímero provoca inúmeras respostas de defesa relacionadas a estresses bióticos e abióticos, estimula a taxa fotossintética, fechamento estomático por síntese de ABA, aumenta as enzimas antioxidantes via óxido nítrico e vias de sinalização do peróxido de hidrogênio, além de induzir a a produção de ácidos orgânicos, açúcares, aminoácidos e outros metabólitos necessários para o ajuste osmótico, sinalização de estresse e metabolismo energético sob estresse (HIDANGMAYUM et al., 2019).

A melatonina (N-acetil-5-metoxitriptamina) é um neurohormônio encontrado em animais, fungos, bactérias e nas plantas (fitomelatonina). Cunhado como um bioestimulador do crescimento das plantas, especialmente sob condições de estresse abiótico (MURCH; ERLAND, 2021). Diferentes condições de estresse desencadeiam a biossíntese endógena de melatonina nas plantas, a qual possui múltiplas funções como osmorregulador, corretor metabólico sob condições estressantes, mobilização de metais pesados, melhora a absorção de nitrogênio e enxofre, regula a atividade antioxidante, funciona como um regulador de rede redox e regulador da expressão gênica (DAWOOD, 2022), reduz a peroxidação lipídica e os níveis de peróxido de hidrogênio nas células (REITER et al., 2015; ZHANG et al., 2014b), como uma resposta antiestresse natural das plantas.

O peróxido de hidrogênio, em baixas concentrações, pode atuar como molécula sinalizadora na quebra da dormência das sementes e no aumento da dinâmica da germinação

das sementes. Resultados da absorção de água durante a embebição das sementes na iniciação de vários processos de respiração aeróbica em organelas celulares como mitocôndrias, peroxissomos e o espaço apoplástico de sementes em germinação são responsáveis pelo acúmulo de radicais superóxido (O_2^-) (ANAND et al., 2019a). A concentração de ROS produzida é fortemente regulada por enzimas sequestrantes de ROS, como superóxido dismutase, catalase e peroxidase, que permitem que elas atuem como mensageiros celulares por existirem em níveis críticos, conhecidos como “janela oxidativa” (BAILLY; EL-MAAROUF-BOUTEAU, 2008). Os radicais ponto- radicais O_2 são rapidamente dismutados em H_2O_2 pela superóxido dismutase celular (SOD). H_2O_2 são ainda mantidos dentro da "faixa de janela oxidativa" pela atividade da catalase (CAT) para atuar como molécula de sinalização. O H_2O_2 tem uma vida útil mais longa e uma molécula facilmente difusível para atravessar as membranas para atingir o local alvo (embrião) de seus locais de produção (ANAND et al., 2019b)). O H_2O_2 interage como molécula sinalizadora com fitohormônios como ácido giberélico (GA) e ácido absísico (ABA), ativando assim enzimas relacionadas à germinação, como α -amilase, quebrando a dormência das sementes (WEISS; ORI, 2007).

O ácido indolacético (AIA) são conhecidos por estimular diversos processos nas plantas, como divisão, alongamento celular e diferenciação celular, levando ao crescimento de frutos, desenvolvimento de gemas apicais e laterais, bem como alongamento de caule e raiz (OHISHI et al., 2021), senescência foliar e crescimento das flores (DAVIES, 2010).

REFERÊNCIAS

- ABID, M. et al. Seed osmopriming invokes stress memory against post-germinative drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 145, p. 12–20, 1 jan. 2018.
- ABREU, V. M. et al. Physiological performance and expression of isozymes in maize seeds subjected to water stress 1 Viviane Maria de Abreu 2 *, Édila Vilela de Resende. **Journal of Seed Science**, v. 36, n. 1, p. 040–047, 2014.
- AKTER, N.; ISLAM, M. R. Heat stress effects and management in wheat. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, n. 5, 1 out. 2017.
- ALMEIDA, A. DA S. et al. Protrusão da radícula e métodos para superação de dormência de sementes de trigo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 3, p. 271–276, 11 nov. 2016.
- ALLOUI, H. et al. Germination and growth in control and primed seeds of pepper germination and growth in control and primed seeds of pepper as affected by salt stress. **Cercetări Agronomice în Moldova**, v. XLVII, n. 3, 2014.
- ANAND, U. et al. metabolites A Comprehensive Review on Medicinal Plants as Antimicrobial Therapeutics: Potential Avenues of Biocompatible Drug Discovery. **Metabolites**, v. 9, p. 258, 2019a.
- ANAND, U. et al. A Comprehensive Review on Medicinal Plants as Antimicrobial Therapeutics: Potential Avenues of Biocompatible Drug Discovery. **Metabolites**, v. 9, p. 258, 2019b.
- ANDRADE, C. A. . et al. Hydrogen peroxide promotes the tolerance of soybeans to waterlogging. **Scientia Horticulturae**, v. 232, p. 40–45, 2018.
- ARAÚJO, P. C. et al. Condicionamento fisiológico e vigor d sementes d maxixe. **Journal of Seed Science**, v. 33, n. 3, p. 482–489, 2011.
- ARIF, M. et al. Evaluating the impact of osmopriming varying with polyethylene glycol concentrations and durations on soybean. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 16, n. 2, p. 359–364, 2014.
- ARMONDES, K. A. P. et al. Condicionamento osmótico e desempenho de sementes de repolho com diferentes níveis de vigor. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 3, p. 428–434, 1 jul. 2016.
- ATAÍDE, G. M. et al. Óxido nítrico na germinação de sementes de baixo vigor de *Dalbergia nigra*. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 3, p. 438–444, 24 jan. 2015.
- BAGHERI, M.; GHOLAMI, M.; BANINASAB, B. Hydrogen peroxide-induced salt tolerance in relation to antioxidant systems in pistachio seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 243, p. 207–213, 3 jan. 2019.
- BAILLY, C.; EL-MAAROUF-BOUTEAU, H. Oxidative signaling in seed germination and dormancy. **Plant Signaling & Behavior**, v. 3, p. 175–182, 2008.
- BARBA-ESPÍN, G. et al. Understanding the role of H₂O₂ during pea seed germination: A

- combined proteomic and hormone profiling approach. **Plant, Cell and Environment**, v. 34, n. 11, p. 1907–1919, nov. 2011.
- BATISTA, R. A. B. et al. Lactose in processed foods: Evaluating the availability of information regarding its amount. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 23, n. 12, p. 4119–4128, 1 dez. 2018.
- BAZZAZ, M. M. et al. Canopy Temperature and Yield Based Selection of Wheat Genotypes for Water Deficit Environment. **Open Access Library Journal**, v. 2, n. 10, p. 1–11, 30 out. 2015.
- BECKLES, D. M.; THITISAKSAKUL, M. How environmental stress affects starch composition and functionality in cereal endosperm. **Starch/Staerke**, v. 66, n. 1–2, p. 58–71, jan. 2014.
- BHANUPRAKASH, K.; YOGEESSHA, H. S. Preparação de sementes para tolerância ao estresse abiótico: uma visão geral. **Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops.**, 2016.
- BHATIA, D. et al. Introgression of Yield Component Traits in Rice (*Oryza sativa* ssp. indica) through Interspecific Hybridization. **Crop Science**, v. 57, n. 3, p. 1557–1573, 1 maio 2017.
- BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-Aeration following Hypoxia or Anoxia Leads to Activation of the Antioxidative Defense System in Roots of Wheat Seedlings. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 651, 1998.
- BONOME, L. T. DA S. et al. Osmoconditioning of urochloa brizantha seeds to reduce pelleting negative effects. **BRAZILIAN JOURNAL OF AGRICULTURE - Revista de Agricultura**, v. 92, n. 2, p. 87, 8 ago. 2017.
- BOSETTI, F. **Diversidade genética em germoplasma de arroz japonês utilizando marcadores moleculares e agromorfológicos.** [s.l.] Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.
- BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para Análise de Sementes.** [s.l.: s.n.].
- BUEGE, J. A.; AUST, S. D. Microsomal Lipid Peroxidation. **Methods in Enzymology**, v. 52, n. C, p. 302–310, 1 jan. 1978.
- CAI, Y. et al. Effects of water stress during grain-filling period on rice grain yield and its quality under different nitrogen levels. **The Journal of Applied Ecology**, v. 17, n. 7, p. 1201–1206, 2006.
- CAO, Y. Y. et al. Growth characteristics and endosperm structure of superior and inferior spikelets of indica rice under high-temperature stress. **Biologia Plantarum**, v. 60, n. 3, p. 532–542, 1 set. 2016.
- CARDOSO, E. D. et al. Qualidade fisiológica e composição química de sementes de brachiaria brizantha em função do condicionamento osmótico. **REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL**, v. 2, n. 2, p. 42–48, 7 jul. 2015.
- CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. Sementes: ciência tecnologia e produção. In: FUNEP (Ed.). . Jaboticabal: [s.n.]. p. 588.
- CAVALCANTI, L. S. . et al. **Indução de resistência em plantas a patógenos e insetos.**

Piracicaba: [s.n.].

CHILDS, N. et al. Rice Outlook : December 2021 In this report : **USDA**, p. 1–15, 2021.

CHUNG, W. H. Unraveling new functions of superoxide dismutase using yeast model system: Beyond its conventional role in superoxide radical scavenging. **Journal of Microbiology**, v. 55, n. 6, p. 409–416, 1 jun. 2017.

COHEN, I. et al. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. **Physiologia Plantarum**, v. 171, n. 1, p. 66–76, 1 jan. 2021.

CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. **Boletim da Safra 2021**, v. 8, n. Terceiro levantamento, p. 59, 2021.

COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, v. 30, n. 8, p. 1340–1357, 1 ago. 2016.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Produção e qualidade fisiológica de sementes de arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 23, n. 2, p. 287–293, 30 dez. 2001.

DAS, K. .; ROYCHOUDHURY, A. Espécies reativas de oxigênio (ROS) e resposta de antioxidantes como scavengers ROS durante o estresse ambiental em plantas. **Fronteiras na Ciência Ambiental**, v. 2, p. 53, 2014.

DASZKOWSKA-GOLEC, A. Arabidopsis seed germination under abiotic stress as a concert of action of phytohormones. **Omics : a journal of integrative biology**, v. 15, n. 11, p. 763–774, 1 nov. 2011.

DAVIES, P. J. The plant hormones: Their nature, occurrence, and functions. **Plant hormones**, p. 1–15, 2010.

DAWOOD, M. F. A. Melatonin: an elicitor of plant tolerance under prevailing environmental stresses. In: **Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture**. [s.l.] Academic Press, 2022. p. 245–286.

DHINGRA, O. D. Importância e perspectivas do tratamento de sementes no Brasil. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 7, n. 1, p. 133–138, 1985.

DU, S. T. et al. Atmospheric application of trace amounts of nitric oxide enhances tolerance to salt stress and improves nutritional quality in spinach (*Spinacia oleracea* L.). **Food Chemistry**, v. 173, p. 905–911, 15 abr. 2015.

FAN, G. et al. Chitosan activates defense responses and triterpenoid production in cell suspension cultures of *Betula platyphylla* Suk | . **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 19, p. 2816–2820, 2010.

FAN, H. et al. Exogenous nitric oxide improves chilling tolerance of Chinese cabbage seedlings by affecting antioxidant enzymes in leaves. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 55, n. 3, p. 159–165, 2014.

FARIAS, J. R. B. . et al. **Restrições de disponibilidade hídrica à obtenção de elevados rendimentos de grãos de soja**. Congresso Brasileiro de Sementes. **Anais...2006**

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Oxygen processing in photosynthesis: Regulation and signalling. **New Phytologist**, v. 146, n. 3, p. 359–388, jun. 2000.

- FRITSCHÉ-NETO, R.; DOVALE, J. C.; CAVATTE, P. C. Melhoria para tolerância a estresses ou para eficiência no uso de recursos? In: **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: [s.n.]. p. 39–79.
- FUKAI, S.; COOPER, M. Development of drought-resistant cultivars using physiomorphological traits in rice. **Field Crops Research**, v. 40, n. 2, p. 67–86, 1995.
- GADJEV, I.; STONE, J. M.; GECHEV, T. S. Programmed cell death in plants: new insights into redox regulation and the role of hydrogen peroxide. **International review of cell and molecular biology**, v. 270, n. C, p. 87–144, 2008.
- GAO, X. et al. Tsc tumour suppressor proteins antagonize amino-acid-TOR signalling. **Nature Cell Biology**, v. 4, n. 9, p. 699–704, 2002.
- GARCÍA-CAPARRÓS, P. et al. Oxidative Stress and Antioxidant Metabolism under Adverse Environmental Conditions: a Review. **The Botanical Review**, v. 87, n. 4, p. 421–466, 1 dez. 2020.
- GE, X. M. et al. A proteína G heterotrimérica medeia o fechamento estomático induzido por etileno via síntese de peróxido de hidrogênio em Arabidopsis. **Plant**, v. 82, p. 138–150, 2015.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–14, fev. 1977.
- GUIMARÃES, M.A.; GUIMARÃES, A.; SANTANA, T.A.; SILVA, E.V.; ZENZEN, I.; LOUREIRO, M. E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, n. 3, p. 58, 2008.
- GUO, T. R.; ZHANG, G. P.; ZHANG, Y. H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 57, n. 2, p. 182–188, 15 jun. 2007.
- HANCOCK, J. T. Oxidative Stress and Redox Signalling in Plants. **eLS**, p. 1–7, 2 mar. 2016.
- HASANUZZAMAN, M. et al. Hydrogen peroxide pretreatment mitigates cadmium-induced oxidative stress in Brassica napus L.: An intrinsic study on antioxidant defense and glyoxalase systems. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 10 fev. 2017.
- HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant physiology**, v. 84, n. 2, p. 450–455, 1 jun. 1987.
- HERNÁNDEZ-BARRERA, A. et al. Hyper, a hydrogen peroxide sensor, indicates the sensitivity of the Arabidopsis root elongation zone to aluminum treatment. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 1, p. 855–867, 6 jan. 2015.
- HEYDECKER, W.; COOLBEAR, P. Seed treatments for improved performance-survey and attempted prognosis. **Seed Science and Technology**, v. 5, p. 353–425, 1977.
- HIDANGMAYUM, A. et al. Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 25, n. 2, p. 313–326, 5 mar. 2019.
- HU, H.; XIONG, L. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 715–741, 2014.
- IBGE. Indicadores IBGE. **Estatística da produção agrícola 2021.**, p.

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/ag>, 2021.

ISHIBASHI, Y. et al. Hydrogen peroxide spraying alleviates drought stress in soybean plants. **Journal of plant physiology**, v. 168, n. 13, p. 1562–1567, 1 set. 2011.

ISHIBASHI, Y. et al. The interrelationship between abscisic acid and reactive oxygen species plays a key role in barley seed dormancy and germination. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 21 mar. 2017.

JUNG, K. H.; AN, G.; RONALD, P. C. Towards a better bowl of rice: Assigning function to tens of thousands of rice genes. **Nature Reviews Genetics**, v. 9, n. 2, p. 91–101, fev. 2008.

KAISER, I. S. et al. Efeito de liberadores de óxido nítrico na qualidade fisiológica de sementes de repolho sob salinidade. **Revista Ceres**, v. 63, n. 1, p. 39–45, 2016.

KERCHEV, P. I.; BREUSEGEM, F. VAN. Improving oxidative stress resilience in plants. **Plant Journal**, v. 109, n. 2, p. 359–372, 1 jan. 2022.

KHOUBNASABJAFARI, M.; ANSARIN, K.; JOUYBAN, A. Reliability of malondialdehyde as a biomarker of oxidative stress in psychological disorders. **BioImpacts**, v. 5, n. 3, p. 123–127, 2015.

LANNA, A.C; CARVALHO, M.A.F.; HEINEMANN, A.B.; STEIN, V. C. **Panorama Ambiental e Físio-Molecular do Arroz de Terras Altas**. Santo Antônio de Goiás: [s.n.]. Disponível em: <www.cnpaf.embrapa.br>.

LAWLOR, D. W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 275–294, 2002.

LEI, C. et al. Foliar application of chitosan activates artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 1, p. 176–182, jan. 2011.

LI, C. R. et al. Unravelling mitochondrial retrograde regulation in the abiotic stress induction of rice ALTERNATIVE OXIDASE 1 genes. **Plant, Cell and Environment**, v. 36, n. 4, p. 775–788, abr. 2013.

LI, X.; ZHANG, L. SA and PEG-induced priming for water stress tolerance in rice seedling. **Advances in Intelligent and Soft Computing**, v. 134 AISC, p. 881–887, 2012.

LIMA, K. S. et al. Chitosan and Laponite: a meta-analysis on their applications. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e132101320903–e132101320903, 9 out. 2021.

LIMÓN-PACHECO, J.; GONSEBATT, M. E. **The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress** *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* *Mutat Res*, , mar. 2009.

LIU, X. et al. Physiological and visible injury responses in different growth stages of winter wheat to ozone stress and the protection of spermidine. **Atmospheric Pollution Research**, v. 6, n. 4, p. 596–604, 9 jul. 2015.

LIZÁRRAGA-PAULÍN, E. G. et al. Chitosan application in maize (*Zea mays*) to counteract the effects of abiotic stress at seedling level. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 34, p. 6439–6446, 26 set. 2013.

- MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 6. ed. Londrina: [s.n.].
- MARINI, P. et al. Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de arroz submetidas ao estresse térmico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 4, p. 722–730, 2012.
- MARUTA, T. et al. Diversity and evolution of ascorbate peroxidase functions in chloroplasts: More than just a classical antioxidant enzyme? **Plant and Cell Physiology**, v. 57, n. 7, p. 1377–1386, 2016.
- MATHEUS, M. T.; LOPES, C. J. TEMPERATURAS CARDINAIS PARA A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE *Erythrina variegata* L. 1. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, p. 115–122, 2009.
- MERTZ, L. M. et al. Physiological changes in rice seeds exposed to cold in the germination phase. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 2, p. 262–270, 2009.
- MILADINOV, Z. et al. Optimal time of soybean seed priming and primer effect under salt stress conditions. **Journal of Agricultural Sciences, Belgrade**, v. 60, n. 2, p. 109–117, 2015.
- MITCHELL, J. et al. Gibberellin response in the embryo epidermis regulates germination uniformity in response to seed priming. **bioRxiv**, p. 436121, 5 out. 2018.
- MITTLER, R. ROS Are Good. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 1, p. 11–19, 1 jan. 2017.
- MONDAL, M. M. A. et al. Foliar application of chitosan improves growth and yield in maize. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, p. 520–523, 2013.
- MORAIS, O. P. DE et al. Cultivares de Arroz de Terras Altas para o Mato Grosso. **Circular Técnica 68**, p. 1–8, 2004.
- MORISON, J. I. L. et al. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 639–658, 12 fev. 2007.
- MULLINEAUX, P. M.; RAUSCH, T. Glutathione, photosynthesis and the redox regulation of stress-responsive gene expression. **Photosynthesis Research**, v. 86, n. 3, p. 459–474, dez. 2007.
- MURCH, S. J. ; ERLAND, L. A. E. A Systematic Review of Melatonin in Plants: An Example of Evolution of Literature. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1–24, 2021.
- NAEEM, A. et al. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. **Environmental Pollution**, v. 242, p. 126–135, 1 nov. 2018.
- NAFEES, M. . et al. Sinalização de espécies reativas de oxigênio em plantas. In: **Plant Abiotic Stress Tolerance**. [s.l: s.n.]. p. 259–272.
- NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867–880, ago. 1981.
- NAKAO, E. A.; CARDOSO, V. Priming and temperature limits for germination of dispersal units of *Urochloa brizantha* (Stapf) Webster cv. basilisk. **Braz. J. Biol**, v. 75, n. 1, p. 234–241, 2015.

- NAWAZ, F. et al. Selenium (Se) Seed Priming Induced Growth and Biochemical Changes in Wheat Under Water Deficit Conditions. **Biological trace element research**, v. 151, n. 2, p. 284–293, 2013.
- NGUYEN, H. T.; BABU, R. C.; BLUM, A. Breeding for drought resistance in rice: Physiology and molecular genetics considerations. **Crop Science**, v. 37, n. 5, p. 1426–1434, 1997.
- OHISHI, N. et al. Involvement of auxin biosynthesis and transport in the antheridium and prothalli formation in *lygodium japonicum*. **Plants**, v. 10, n. 12, 1 dez. 2021.
- OLIVEIRA, A. S. **Condicionamento Fisiológico de Sementes de Tabaco**. Lavras: Tese (Doutorado em Fitotecnia)- Universidade Federal de Lavras, 2016.
- OLIVEIRA, F. H. S. .; MONDO, V. H. V. **Condicionamento fisiológico de semente de arroz (*Oryza sativa* L.): Efeitos sobre o ciclo e produção da cultura**. (Embrapa Arroz e Feijão, Ed.)9º Seminário Jovens Talentos: Coletânea dos Resumos. **Anais...**2015
- OLIVEIRA, T. F. et al. Protective action of priming agents on *Urochloa brizantha* seeds under water restriction and salinity conditions. **Journal of Seed Science**, v. 43, 31 maio 2021.
- ONU. **População mundial deve ter mais 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos**ONU NEWS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/06/1676601>>. Acesso em: 2 mar. 2022.
- OZYIGIT, I. I. et al. Identification and comparative analysis of H₂O₂-scavenging enzymes (ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase) in selected plants employing bioinformatics approaches. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. MAR2016, 22 mar. 2016.
- PANDA, S. et al. Proofing Direct-Seeded Rice with Better Root Plasticity and Architecture. **International Journal of Molecular Sciences 2021, Vol. 22, Page 6058**, v. 22, n. 11, p. 6058, 4 jun. 2021.
- PAPARELLA, S. et al. Seed priming: state of the art and new perspectives. **Plant Cell Reports**, v. 34, n. 8, p. 1281–1293, 24 ago. 2015.
- PEREIRA, F. J. **CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DE AGUAPÉ E ÍNDICE DE FITORREMEDIAÇÃO DE ALFACE D`ÁGUA CULTIVADOS NA PRESENÇA DE ARSÊNIO, CÁDMIO E CHUMBO**. [s.l.] Tese(doutorado)-Universidade Federal de Lavras, 2010.
- PEREIRA, S. R. et al. Priming of *Urochloa brizantha* cv. Xaraés seeds. **African Journal of Agriculture Research**, v. 13, n. 1, p. 2804–2807, 2018.
- PETROV, V. et al. ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. FEB, p. 69, 18 fev. 2015.
- PIMENTEL, C. **A Relação da Planta com a Água**. [s.l: s.n.].
- PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. D. M. D.; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1 SPEC. ISS., p. 34–42, 5 maio 2006.
- PIRES, R. M. DE O. et al. Action of nitric oxide in sesame seeds (*Sesamum indicum* L.) submitted to stress by cadmium. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 1, p. 22–29, 4 abr. 2016.

- PRADHAN, N.; PRAKASHP.; TIWARIS, S.K.; CHINNAPPAM.; SHARMA, R.P.; SINGH, P. M. Osmopriming of Tomato Genotypes with Polyethylene Glycol 6000 Induces Tolerance to Salinity Stress. **Trends in Biosciences**, v. v. 7, p. 4412–4417, 2014.
- QUAN, L. J. et al. Hydrogen peroxide in plants: A versatile molecule of the reactive oxygen species network. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 50, n. 1, p. 2–18, jan. 2008.
- REED, R. C.; BRADFORD, K. J.; KHANDAY, I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. **Heredity**, 2022.
- REITER, R. J. et al. Phytemelatonin: Assisting plants to survive and thrive. **Molecules**, v. 20, n. 4, p. 7396–7437, 1 abr. 2015.
- RIBEIRO, E. C. G. et al. Physiological quality of *Urochloa brizantha* seeds submitted to priming with calcium salts. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 49, 6 fev. 2019.
- ROY, S. J.; TUCKER, E. J.; TESTER, M. Genetic analysis of abiotic stress tolerance in crops. **Current opinion in plant biology**, v. 14, n. 3, p. 232–239, jun. 2011.
- RUTTANARUANGBOWORN, A. et al. Effect of seed priming with different concentrations of potassium nitrate on the pattern of seed imbibition and germination of rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 605–613, 1 mar. 2017.
- SABERALI, S. F.; MORADI, M. Effect of salinity on germination and seedling growth of *Trigonella foenum-graecum*, *Dracocephalum moldavica*, *Satureja hortensis* and *Anethum graveolens*. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 3, p. 316–323, 1 jul. 2019.
- SACHDEV, S. et al. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, v. 10, n. 2, p. 1–37, 1 fev. 2021.
- SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. DÉFICIT HÍDRICO E OS PROCESSOS MORFOLÓGICO E FISIOLÓGICO DAS PLANTAS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287–294, 1998.
- SANZ, L. et al. Nitric oxide (NO) and phytohormones crosstalk during early plant development. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 10, p. 2857–2868, 1 maio 2015.
- SCHWEMBER, A. R.; BRADFORD, K. J. Quantitative trait loci associated with longevity of lettuce seeds under conventional and controlled deterioration storage conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 15, p. 4423–4436, 1 out. 2010.
- SEWELAM, N.; KAZAN, K.; SCHENK, P. M. Sinalização global de estresse em plantas: espécies reativas de oxigênio na encruzilhada. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 187, 2016.
- SHARMA, P. et al. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and Antioxidant Status of *Brassica juncea*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 167, n. 8, p. 2225–2233, ago. 2012.
- SILVA, A. L. D. ; et al. Effect of cyanide by sodium nitroprusside (SNP) application on germination, antioxidative system and lipid peroxidation of *Senna macranthera* seeds under saline stress 1. **Journal of Seed Science**, n. 1, p. 86–096, 2019.
- SILVA, C. B. et al. Performance of bell pepper seeds in response to drum priming with addition of 24-epibrassinolide. **HortScience**, v. 50, n. 6, p. 873–878, 2015.

- SILVA, L. M. E et al. Hydrothermal treatment in the management of anthracnose in ‘Prata-Anã’ banana produced in the semiarid region of Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 40, n. 2, p. 1–8, 2018.
- SNEYD, L. Wild Food Consumption and Urban Food Security. **Rapid Urbanisation, Urban Food Deserts and Food Security in Africa**, p. 143–155, 1 jan. 2016.
- SOCOLOWSKI, F.; TAKAKI, M. Germination of Jacaranda mimosifolia (D. Don - Bignoniaceae) seeds: effects of light, temperature and water stress. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 5, p. 785–792, 1 set. 2004.
- SOHAG, A. A. M. et al. Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. **Plant, Soil and Environment**, v. 66, n. 1, p. 7–13, 2020.
- SOSBAI. Arroz Irrigado - Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. **XXIX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**, p. 205, 2018.
- SOUZA, N. M. DE. **TOLERÂNCIA A BAIXAS TEMPERATURAS NA FASE DE MICROSPOROGENESE EM GENÓTIPOS DE ARROZ IRRIGADO**. [s.l.] Dissertação (Produção Vegetal)- Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.
- STEINMETZ, S.; SILVA, S.C.; SANTANA, N. . A cultura do arroz no Brasil. In: FEIJÃO, E. A. E (Ed.). . **Clima**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás: [s.n.]. p. 117–160.
- STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, p. 695–707, 1984.
- TABALDI, L. A. et al. Oxidative stress is an early symptom triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. **Chemosphere**, v. 76, n. 10, p. 1402–1409, 2009.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. [s.l.: s.n.]. v. 6 ed.
- TERRA, T. G. R. et al. Tolerância de linhagens de arroz de terras altas à seca. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 201–208, abr. 2013.
- TEZARA, W. et al. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. **Nature**, v. 401, n. 6756, p. 914–917, 28 out. 1999.
- THOMAS, T. et al. Identification of rice genotypes for seedling stage multiple abiotic stress tolerance. **Plant Physiology Reports**, v. 25, n. 4, p. 697–706, 1 dez. 2020.
- VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants Protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, v. 151, p. 59–66, 2000.
- VERSLUES, P. E. et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, n. 4, p. 523–539, 1 fev. 2006.
- WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. DE. Arroz : composição e características nutricionais. **Ciencia Rural**, v. 38, p. 1184–1192, 2008.
- WANG, W. et al. The effect of storage condition and duration on the deterioration of primed rice seeds. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 13 fev. 2018.
- WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive Oxygen Species in Plant

Signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 209–236, 29 abr. 2018.

WEISS, D.; ORI, N. Mechanisms of Cross Talk between Gibberellin and Other Hormones 1. **Update on Cross Talk between Gibberellin and Other Hormones Mechanisms**, v. 144, p. 1240–1246, 2007.

WEISZ, D. A.; GROSS, M. L.; PAKRASI, H. B. Reactive oxygen species leave a damage trail that reveals water channels in Photosystem II. **Science Advances**, v. 3, n. 11, 2017.

WOJTYLA, Ł. et al. Different modes of hydrogen peroxide action during seed germination. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. FEB2016, p. 66, 4 fev. 2016.

WU, W.; DUNCAN, R. W.; MA, B. L. Quantification of canola root morphological traits under heat and drought stresses with electrical measurements. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 229–244, 1 jun. 2017.

YAN, M. Prolonged storage reduced the positive effect of hydropriming in Chinese cabbage seeds stored at different temperatures. **South African Journal of Botany**, v. 111, p. 313–315, 1 jul. 2017.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop**. Los Baños, Laguna: [s.n.].

ZHANG, N. et al. Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. **Journal of experimental botany**, v. 66, n. 3, p. 647–656, 1 fev. 2014a.

ZHANG, N. et al. Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 3, p. 647–656, 1 fev. 2014b.

ZHANG, Z. et al. Gene Knockout Study Reveals That Cytosolic Ascorbate Peroxidase 2(OsAPX2) Plays a Critical Role in Growth and Reproduction in Rice under Drought, Salt and Cold Stresses. **PLoS ONE**, v. 8, n. 2, 28 fev. 2013.

ZHENG, M. et al. Seed priming in dry direct-seeded rice: consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress. **Plant Growth Regulation**, v. 78, n. 2, p. 167–178, 1 mar. 2016.

CAPÍTULO 2 FISIOLOGIA E BIOQUÍMICA DE SEMENTES DE ARROZ SUBMETIDAS AO CONDICIONAMENTO FISIOLÓGICO

RESUMO

O arroz (*Oryza sativa*) é bastante vulnerável aos estresses abióticos como déficit hídrico e alta temperatura, reduzindo significativamente a produtividade da cultura. Além de reduzir o crescimento das plantas, em condições de estresse pode ocorrer a produção excessiva de espécies reativas de oxigênio o que pode ocasionar danos em membranas celulares e indução da expressão de genes relacionadas a expressão de enzimas do sistema antioxidante. O objetivo nesse trabalho foi avaliar a eficiência do condicionamento fisiológico de sementes de arroz de terras altas na presença de moléculas sinalizadoras para a indução de tolerância à deficiência hídrica e altas temperaturas durante os processos de germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas. Inicialmente, avaliou-se a qualidade inicial das sementes das cultivares BRS Soberana (suscetível ao déficit hídrico) e Douradão (tolerante ao déficit hídrico) por meio da determinação do grau de umidade e teste de germinação e vigor. As sementes dos dois genótipos foram condicionadas em soluções de quitosana, ácido indolacético (AIA), melatonina, nitroprussiato de sódio (SNP) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Determinou-se o teor de água, germinação e vigor pelo teste de primeira contagem, o desenvolvimento de plântulas por análise de imagem, peroxidação lipídica, peróxido de hidrogênio e a atividade das enzimas do sistema antioxidante: catalase, ascorbato peroxidase e superóxido dismutase. O experimento foi realizado em delineamento inteiramente casualizado (DIC) com quatro repetições, em esquema fatorial ($2 \times 3 \times 5$), sendo duas cultivares, três condições de germinação (estresse hídrico, alta temperatura e condição normal) e cinco moléculas condicionantes. As análises bioquímicas foram realizadas em triplicatas para cada amostra biológica. O condicionamento fisiológico foi eficiente em minimizar os efeitos negativos da restrição hídrica e alta temperatura ($40^\circ C$), quando comparado as sementes condicionadas mas sem estresse. O condicionamento fisiológico minimizou os efeitos negativos da restrição hídrica e alta temperatura durante o processo de germinação de sementes e emergência de plântulas de arroz de terras altas. O uso da quitosana foi eficiente para minimizar os efeitos do estresse térmico da cultivar BRS Soberana, enquanto o SNP foi eficaz no déficit hídrico, durante a germinação de semente e emergência de plântulas de arroz. O condicionamento fisiológico com AIA resultou em tolerância ao estresse hídrico durante o processo de germinação de sementes e emergência de plântulas da cultivar Douradão. Para a cultivar Douradão o condicionamento com AIA e quitosana permitiu a expressão do vigor de sementes de arroz de terras altas submetidas ao estresse térmico. Ao longo do desenvolvimento da plântula (aos cinco e 14 dias após a semeadura) houve variação na atividade das enzimas em função das moléculas sinalizadoras utilizadas. As atividades da APX, CAT e SOD em sementes e plântulas de arroz variam com o genótipo e moléculas sinalizadoras utilizadas.

Palavras chave: Estresse oxidativo. Estresse abiótico. Desenvolvimento de plântulas.

PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY OF RICE SEEDS SUBMITTED TO PHYSIOLOGICAL CONDITIONING

ABSTRACT

Rice (*Oryza sativa*) is quite vulnerable to abiotic stresses such as water deficit and high temperature, significantly reducing crop productivity. In addition to reducing plant growth, under stress conditions, excessive production of reactive oxygen species can occur, which can cause damage to cell membranes and induce the expression of genes related to the expression of enzymes of the antioxidant system. The objective of this work was to evaluate the efficiency of physiological conditioning of upland rice seeds in the presence of signaling molecules for the induction of tolerance to water deficit and high temperatures during the processes of seed germination and seedling development. Initially, the initial quality of seeds of cultivars BRS Soberana (susceptible to water deficit) and Douradão (tolerant to water deficit) was evaluated by determining the degree of moisture and germination and vigor test. The seeds of both genotypes were conditioned in solutions of chitosan, indoleacetic acid (AIA), melatonin, sodium nitroprusside (SNP) and hydrogen peroxide (H₂O₂). Water content, germination and vigor were determined by the first count test, seedling development by image analysis, lipid peroxidation, hydrogen peroxide and the activity of the antioxidant system enzymes: catalase, ascorbate peroxidase and superoxide dismutase. The experiment was carried out in a completely randomized design (DIC) with four replications, in a factorial scheme (2x3x5), with two cultivars, three germination conditions (water stress, high temperature and normal condition) and five conditioning molecules. Biochemical analyzes were performed in triplicate for each biological sample. Physiological conditioning was efficient in minimizing the negative effects of water restriction and high temperature (40°C), when compared to seeds conditioned but without stress. Physiological conditioning minimized the negative effects of water restriction and high temperature during the process of seed germination and emergence of upland rice seedlings. The use of chitosan was efficient to minimize the effects of the heat stress of the cultivar BRS Soberana, while the SNP was effective in the water deficit, during seed germination and emergence of rice seedlings. The physiological conditioning with AIA resulted in tolerance to water stress during the process of seed germination and seedling emergence of the cultivar Douradão. For the cultivar Douradão, conditioning with AIA and chitosan allowed the expression of vigor of upland rice seeds subjected to thermal stress. Throughout the seedling development (at five and 14 days after sowing) there was a variation in the activity of the enzymes as a function of the signaling molecules used. The activities of APX, CAT and SOD in rice seeds and seedlings vary with the genotype and signaling molecules used.

Key-words: Oxidative stress. Abiotic stress. Seedling development.

1 INTRODUÇÃO

O arroz de terras altas, no Brasil, é cultivado sobretudo na região dos Cerrados, onde frequentemente tem-se a ocorrência de estiagens e veranicos, associados a altas temperaturas. Por ser bastante vulnerável a estresses abióticos como seca, e temperaturas extremas, além de diminuir o rendimento (MORISON et al., 2007; ROY; TUCKER; TESTER, 2011; STEINMETZ, S.; SILVA, S.C.; SANTANA, 2006) pode acarretar um aumento da produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020), elevando as concentrações nas células.

As EROs são produzidas naturalmente durante os processos oxidativos biológicos, em diferentes organelas como o apoplasto, mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020) e em condições normais, há uma estabilidade entre a geração e eliminação de EROs. No entanto, o equilíbrio entre a eliminação de EROs e a produção, frequentemente, pode ser interrompido sob condições estressantes, e uma superprodução podem induzir lesões celulares pela oxidação de proteínas (AKTER et al., 2015), danos ao DNA e peroxidação lipídica (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020). Entretanto, se esta produção for exagerada, levando a morte celular programada (MITTLER, 2017). Por outro lado, o aumento na produção de espécies reativas de oxigênio são cruciais em vários processos biológicos, bem como na modificação de vias de transdução de sinal e expressão gênica (NAFEES et al., 2019).

Contudo, para eliminar as EROs produzidas continuamente, seja durante os processos metabólicos normais ou em condições de estresse acarreta as plantas desenvolverem um complexo sistema antioxidante, caracterizando um sistema de defesa bem desenvolvido contra as EROs. Esse sistema constitui uma complexa gama de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos que regulam as EROs, protegendo as células dos danos oxidativos. Enzimas, incluindo catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), e ascorbato peroxidase (APX) trabalham em conjunto para regular as quantidades de EROs (DAS; ROYCHOUDHURY, 2014; HANCOCK, 2016; SEWELAM, N.; KAZAN, K.; SCHENK, 2016).

As SOD, estão presentes em todas as células e são a primeira barreira contra o dano oxidativo. A principal função dessas enzimas é a conversão do radical $O_2\cdot$ em H_2O_2 e oxigênio molecular (CHUNG, 2017). As CAT, presentes nos peroxissomos e mitocôndrias, são responsáveis pela dismutação do peróxido de hidrogênio em água e oxigênio (LIU et al., 2015). A ascorbato peroxidase pertence à categoria das peroxidases, são responsáveis pela redução do peróxido de hidrogênio a água usando o ascorbato (AsA) como doador de elétrons. Estão

presentes em diferentes compartimentos celulares, como mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020).

Nesse sentido, a técnica do condicionamento fisiológico, também conhecido como priming, visa aumentar a velocidade e a uniformidade da germinação de sementes tem apresentados resultados promissores no tratamento de sementes. Além de aumentar a capacidade de geminação, maior vigor e uniformidade das sementes em diversas espécies (ABID et al., 2018; ARIF et al., 2014; ARMONDES et al., 2016; RUTTANARUANGBOWORN et al., 2017), a técnica aumenta a eficiência do sistema antioxidante de defesa das sementes (WANG et al., 2018; YAN, 2017; ZHENG et al., 2016) e se estende ao longo do desenvolvimento da planta.

Diversas moléculas têm sido descritas com indutoras de sinais. O peróxido de hidrogênio em baixas concentrações, atua como uma molécula sinalizadora, desencadeando tolerância a diversos estresses bióticos e abióticos e, em altas concentrações, leva à peroxidação de lipídeos (QUAN et al., 2008). SANZ et al. (2015) relatam que o óxido nítrico está envolvido na regulação do crescimento e desenvolvimento da planta, na defesa contra patógeno e nas respostas ao estresse abiótico.

Em condições de estresses, a síntese de melatonina nas plantas limita os estresses oxidativos, pela indução da expressão de genes, pela redução da peroxidação lipídica e dos níveis de H_2O_2 , e crescimento do sistema antioxidante enzimático, ou mesmo quelando metais pesados (REITER et al., 2015; ZHANG et al., 2014b). Estudos evidenciam o potencial da quitosana para induzir tolerância ao déficit hídrico em plantas (LIZÁRRAGA-PAULÍN et al., 2013), aumenta a altura de plantas, o número de ramificações da parte aérea, número de folhas, área foliar, atributos de biomassa (MONDAL et al., 2013). O ácido indolacético (AIA) são conhecidas por estimular processos de divisão, alongamento celular e diferenciação celular, levando ao crescimento de frutos, desenvolvimento de gemas apicais e laterais, bem como alongamento de caule e raiz (OHISHI et al., 2021), senescência foliar e crescimento das flores (DAVIES, 2010). Diante disso, o objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência do condicionamento fisiológico de sementes na presença de moléculas sinalizadoras para a indução de tolerância à deficiência hídrica e altas temperaturas durante os processos de germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas de arroz de terras altas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS) do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras-MG. Foram utilizadas sementes das cultivares Douradão (MAPA/RNC Registro 00630 Mantenedores-EPAMIG e EMBRAPA), tolerante a estresse hídrico e cultivar BRS Soberana (MAPA/RNC Registro 04360 Mantenedor- EMBRAPA), suscetível a estresse hídrico, multiplicadas no Centro de Desenvolvimento e Transferência de Tecnologia (CDTT) da UFLA. As sementes das duas cultivares foram colhidas na safra de 2017/2018, as quais foram cultivadas, colhidas, secas e armazenadas em câmara fria, sob as mesmas condições, até o momento das análises.

Após determinação da qualidade inicial das sementes, por meio do teor de água e germinação e vigor, as sementes das duas cultivares foram submetidas ao condicionamento fisiológico.

O condicionamento fisiológico das sementes foi realizado em BOD adaptada com um compressor de ar, o qual mantém as soluções aeradas e sem luz. A BOD foi regulada à temperatura de 25°C (PEREIRA et al., 2018) por um período de 20 horas (OLIVEIRA; MONDO, 2015). Foram colocados 40 gramas de sementes em 400 mL de solução condicionante, nas seguintes concentrações: ácido indolacético (100µM), quitosana (0,75mM), melatonina (1mM) e solução doadora de ON, nitroprussiato de sódio (SNP) (100µM) inserir citação.

Após condicionadas, as sementes foram lavadas em água corrente e o excesso da água removido, quando as amostras foram utilizadas para a determinação do teor de água (antes da secagem). Posteriormente, as sementes foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 25°C por 48 horas. As sementes sem condicionamento (controle) também foram colocadas na estufa a fim de uniformizar o teor de água entre as sementes de todos os tratamentos. O teor de água foi determinado logo após a secagem das sementes. Para isso foram retiradas duas repetições com 3 gramas de sementes de cada tratamento e submetidas à estufa a 105°C por 24 horas (BRASIL, 2009). O teor de água foi expresso em porcentagem.

As sementes condicionadas foram submetidas a diferentes condições de germinação: condição controle (água destilada), condição de restrição hídrica induzida por polietileno glicol 6000 – PEG, - 0,9MPa (ABREU et al., 2014) e temperatura alta (40°C) (NAKAO; CARDOSO, 2015).

Para o teste de germinação, quatro repetições de 25 sementes de cada tratamento foram semeadas sobre duas folhas de papel germitest e sobrepostas com mais uma folha, as quais

foram umedecidas com volume das soluções citadas anteriormente, equivalente a 2,5 vezes o peso seco do papel. Os rolos foram colocados em germinador tipo Mangelsdorf regulado a temperatura de 25°C, exceto o estresse por temperatura cujas sementes foram submetidas a temperatura de 40°C, com luz constante, em BOD.

As avaliações foram realizadas aos cinco dias após a semeadura para obtenção da primeira contagem de germinação, e aos 14 dias após a semeadura, para germinação final (BRASIL, 2009). Os resultados de germinação foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

A medição do desenvolvimento das plântulas foi realizada por meio do sistema de captura de imagem GroundEye® (versão S800) composta por um módulo de captação que possui uma câmera de alta resolução, uma bandeja de acrílico e um software integrado para avaliação. Primeiro, realizou-se a configuração da análise pela calibração da cor de fundo, índice de luminosidade, dimensão “a” e dimensão “b”. Após a calibração da cor do fundo foi feita a análise das imagens.

As plântulas utilizadas para análise de imagem foram retiradas do teste de germinação, em que 25 sementes de cada tratamento foram semeadas sobre duas folhas de papel germitest e sobrepostas com mais uma folha, as quais foram umedecidas com o volume de solução contendo as soluções mencionadas, equivalente a 2,5 vezes o peso seco do papel. Os rolos, acondicionados em sacos plásticos para evitar perda de umidade, permaneceram em germinador tipo Mangelsdorf regulado a temperatura de 25°C, exceto o estresse por temperatura, os quais foram submetidos a temperatura de 40°C, com luz contínua, em BOD. As imagens das plântulas foram obtidas aos cinco dias após a semeadura, equivalente ao período de primeira contagem (BRASIL, 2009). Foram extraídos valores das características das plântulas como o comprimento da raiz primária (CRP), comprimento de parte aérea (CPA), largura média da raiz primária (LRP) e a razão do comprimento da raiz pelo comprimento da parte aérea (CR/CPA).

O delineamento utilizado nas análises fisiológicas foi o delineamento inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições, em esquema fatorial (2 x 5 x 3), sendo duas cultivares, cinco soluções condicionantes e três condições de germinação.

Para as análises bioquímicas foram coletadas amostras em três épocas, a primeira após as sementes serem condicionadas e secas, plântulas na primeira contagem e por fim na contagem final. Estas amostras foram armazenadas à temperatura de -80°C até o momento das análises.

Para a extração das enzimas antioxidantes, 200 mg de massa fresca foram macerados em nitrogênio líquido com uma pitada de polivinilpolipirrolidona (PVPP) e homogeneizados em 1,5 mL do tampão de extração contendo 100 mM de fosfato de potássio, 0,1 mM de EDTA e 10 mM de ácido ascórbico. Os homogeneizados foram centrifugados a 12.000 rpm por 10 minutos, a 4°C, coletando-se os sobrenadantes para as análises enzimáticas conforme apresentado por Biemelt; Keetman; Albrecht, (1998)

A atividade da superóxido dismutase (SOD) foi determinada pela capacidade de a enzima inibir a redução fotoquímica do tetrazolio nitroazul (NBT), proposta por (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977). Para tal, 10 µL do extrato foi adicionado a 190 µL tampão contendo 50 mM de fosfato de potássio, 14 mM de metionina, 0,1 mM de EDTA, 75 µM de NBT e 2 µM de riboflavina. Os tubos contendo o tampão juntamente com a amostra, e o controle (meio de incubação sem a amostra), foram iluminados com lâmpada fluorescente de 20W por 7 minutos e as leituras realizadas a 560nm em espectrofotômetro. Uma unidade de SOD é definida pela quantidade de enzima que inibe 50% da taxa de redução do NBT.

Para mensurar a atividade da catalase (CAT), foram pipetados 9 µL do extrato aos quais foram adicionados 90 µL de solução de fosfato de potássio (200 mM) e 72 µL de água.. A esta mistura foi adicionado 9 µL de solução de peróxido de hidrogênio (250 mM). A atividade da CAT foi determinada pelo decréscimo dos valores em absorbância a 240nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio (HAVIR; MCHALE, 1987). A reação foi iniciada pela adição do H₂O₂ ($\epsilon = 36 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$). Uma unidade de CAT é definida pela quantidade de enzima necessária para decompor 1 µmol min⁻¹ de H₂O₂.

A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi analisada pela adição de 9 µL de extrato solução previamente aquecida em banho-maria a 30°C, contendo 90 µL de fosfato de potássio, 9 µL mM de ácido ascórbico e 63 µL de água. Sobre essa mistura foi adicionado 9 µL de peróxido de hidrogênio 2 mM. A atividade da ascorbato peroxidase (APX) foi determinada pela diminuição da absorbância do ascorbato ($\epsilon = 2,8 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$) a 290 nm a cada 15 segundos durante 3 minutos (NAKANO; ASADA, 1981). Uma unidade de APX é definida pela quantidade de enzima que oxida 1µmol min⁻¹ de ácido ascórbico.

Para a extração de H₂O₂ e peroxidação lipídica, 200 mg de massa fresca foram macerados em nitrogênio líquido com uma pitada de polivinilpolipirrolidona (PVPP) e homogeneizados em 1,5 mL de ácido tricloroacético a 0,1% (TCA-0,1%). Os homogeneizados foram centrifugados a 12000 rpm por 15 minutos, a 4°C e, posteriormente o sobrenadante coletado para realização das análises de peroxidação lipídica e H₂O₂.

A avaliação da peroxidação lipídica foi realizada mediante a quantificação do malondialdeído (MDA), que é produzido pela reação de ácido tiobarbitúrico (TBA) conforme método TBARS proposto por Buege; Aust (1978). Para uma alíquota de 125µL do sobrenadante foram adicionados 250µL do meio de reação de ácido tiobarbitúrico 0,5% (TBA) e ácido tricloacético 10% (TCA). A mistura foi aquecida a 95 °C durante 30 minutos e depois rapidamente esfriada em um banho de gelo. Posteriormente foi feita a leitura de absorvância a 535nm e a 600nm e a concentração do MDA calculada utilizando o coeficiente de extinção de 155 mM⁻¹ cm⁻¹.

Para a quantificação do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) uma alíquota de 45 µL do sobrenadante foram adicionados 45µL do tampão fosfato de potássio (10mM à pH 7,0) e 90µL de Iodeto de potássio (1M). Depois, realizou-se a leitura em espectrofotômetro a 390nm e a concentração de peróxido de hidrogênio expressa em µmol de H₂O₂ g⁻¹ de massa fresca (VELIKOVA; YORDANOV; EDREVA, 2000).

Para as análises bioquímicas, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado. Ressalta-se que cada repetição foi feita em triplicata, esquema fatorial (2x3x5), sendo duas cultivares, três condições de germinação e cinco soluções condicionantes.

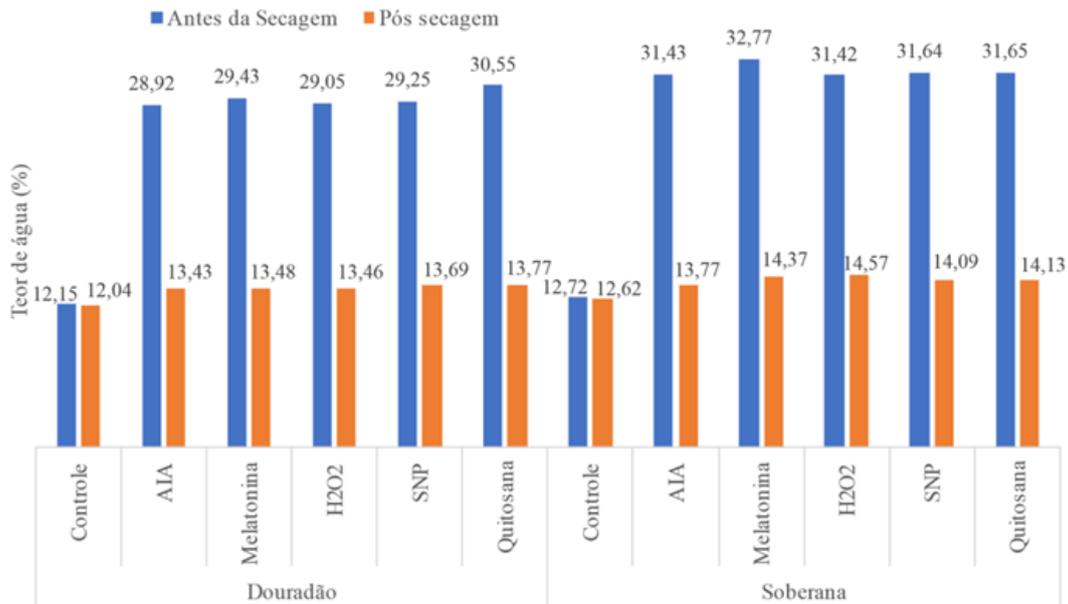
Os dados foram analisados em ensaio fatorial triplo, o qual avaliou o efeito da interação entre os fatores cultivar, condição de germinação (água, restrição hídrica induzida por PEG 6000 e alta temperatura) e soluções condicionantes. Para os dados das variáveis bioquímicas, em sementes condicionadas, foram analisados em ensaio fatorial duplo (soluções x cultivar). A análise estatística dos resultados foi realizada pelo *software* R[®], as médias foram submetidas à análise de variância e, quando significativas, aplicou-se testes de médias a 5% de probabilidade.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram observadas germinação de 92% e 84 % em sementes das cultivares Douradão e BRS Soberana, respectivamente. As sementes das duas cultivares foram produzidas, colhidas e armazenadas nas mesmas condições. Tal resultado evidencia que a de germinação entre as duas cultivares é resultado das diferenças genótípicas das mesmas.

Após o condicionamento fisiológico as sementes das duas cultivares embeberam, em média, duas vezes mais em relação ao teor de água inicial (Figura 1). O condicionamento fisiológico consiste na hidratação controlada das sementes de maneira a permitir a reativação do metabolismo das sementes, fases I e II da germinação (BATISTA et al., 2018; BONOME et al., 2017; HEYDECKER; COOLBEAR, 1977; RIBEIRO et al., 2019). Assim, quanto maior a disponibilidade de água mais processos pré-germinativos poderão ser ativados (BHANUPRAKASH, K.; YOGEESSHA, 2016; MITCHELL et al., 2018; RIBEIRO et al., 2019). O controle da absorção de água é importante para que ocorra equilíbrio entre o potencial hídrico interno das sementes e o da solução condicionante (ALMEIDA et al., 2016; MARCOS-FILHO, 2015), neste momento a embebição é interrompida. Entre os tratamentos, sementes da cultivar Douradão e BRS Soberana condicionadas com quitosana, melatonina e nitroprussiato de sódio tiveram os maiores teores de água (Figura 1).

Figura 1- Teor de água de sementes de arroz, antes e após a secagem, submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio, nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana e não submetidas ao condicionamento (controle).



Após a secagem foram alcançados os graus de umidade das sementes antes do processo (Figura 1). Ao final do condicionamento fisiológico é possível que as sementes sejam secas até atingir o teor de água desejável para o armazenamento e comercialização (RIBEIRO et al., 2019). A secagem é feita sem que a ativação do metabolismo, adquirida pela embebição, seja interrompida. Dessa forma, é possível que as sementes sejam armazenadas por um determinado tempo até a semeadura (WOJTYLA et al., 2016), sem perder os benefícios do condicionamento.

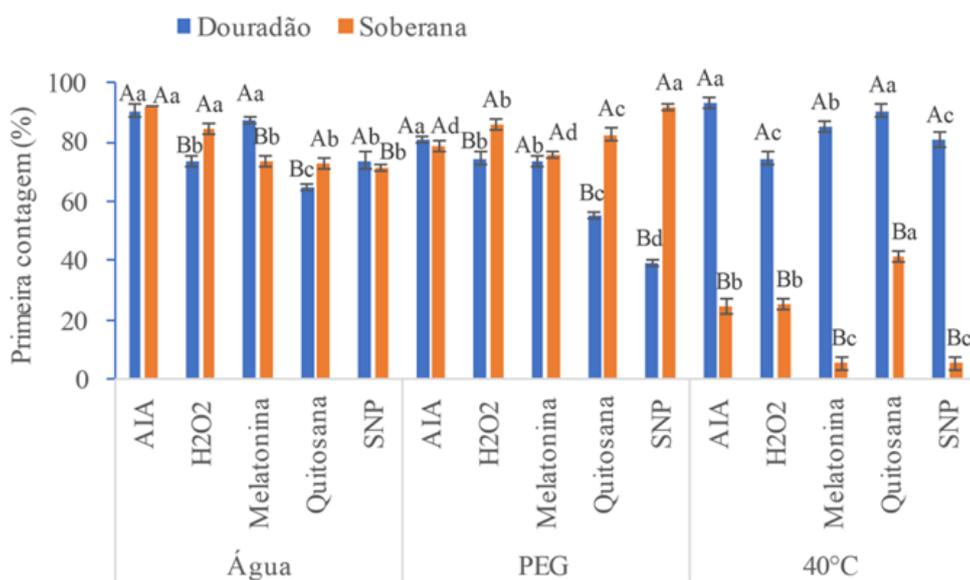
Pelos dados de vigor, determinados pela primeira contagem do teste de germinação (Figura 2), houve diferenças no comportamento dos genótipos. Para a condição de déficit hídrico em sementes da cultivar BRS Soberana foi observada germinação superior à observada em sementes da cultivar Douradão, quando as sementes foram condicionadas com H₂O₂, Quitosana e SNP. Ao contrário, para sementes germinadas em água, o mesmo não foi observado para sementes condicionadas com SNP. Além disso, em sementes da cultivar Douradão houve maior germinação, comparada a das cultivar BRS Soberana, quando condicionada com melatonina.

Para o fator agente condicionante, em condição de estresse hídrico (PEG), observa-se que o nitroprussiato de sódio (SNP) e ácido indolacético (AIA), entre todas as soluções

condicionantes proporcionou maior porcentagem de plântulas normais, para as cultivares BRS Soberana e Douradão, respectivamente (Figura 2). OLIVEIRA et al. (2021), ao trabalharem com sementes *Urochloa brizantha* submetidas à restrição hídrica e estresse salino, verificaram que a aplicação de SNP, via condicionamento fisiológico, resultou em menor porcentagem de sementes dormentes e maior germinação, vigor e desenvolvimento de plantas. Tais resultados corroboram com os encontrados neste estudo.

Ao contrário, para condição de germinação em água, o ácido indolacético (AIA) e o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para a cultivar BRS Soberana e AIA e melatonina para cultivar Douradão, entre todas as soluções foram as que proporcionaram maior germinação (Figura 2). O teste de germinação, em condição normal, apresenta o potencial da semente em condições ideais, o que pode explicar as diferenças no comportamento dos dois genótipos.

Figura 2- Primeira contagem de sementes de arroz, germinadas em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura ($40^\circ C$), submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Em condição de estresse por temperatura alta (40°C) na primeira contagem (Figura 2), a cultivar BRS Soberana se mostrou sensível. Contudo, o uso de quitosana como agente condicionante proporcionou maior porcentagem de plântulas normais. Por outro lado, para a cultivar Douradão maior porcentagem de plântulas normais foi observado para sementes condicionadas com AIA e quitosana, não diferindo entre si (Figura 2).

Ao analisar o fator cultivar, houve diferença de germinação entre elas em todos os condicionantes para sementes germinadas a 40°C, sendo os maiores valores de plântulas normais observados na cultivar Douradão, demonstrando uma maior sensibilidade à alta temperatura da cultivar BRS Soberana. Em períodos de veranicos, a ausência de chuva é acompanhada por ondas de calor que agravam significativamente os efeitos negativos da seca (BAZZAZ et al., 2015; COHEN et al., 2021); cultivares suscetíveis a déficit hídrico, em geral, também demonstram maior sensibilidade ao estresse por temperatura alta.

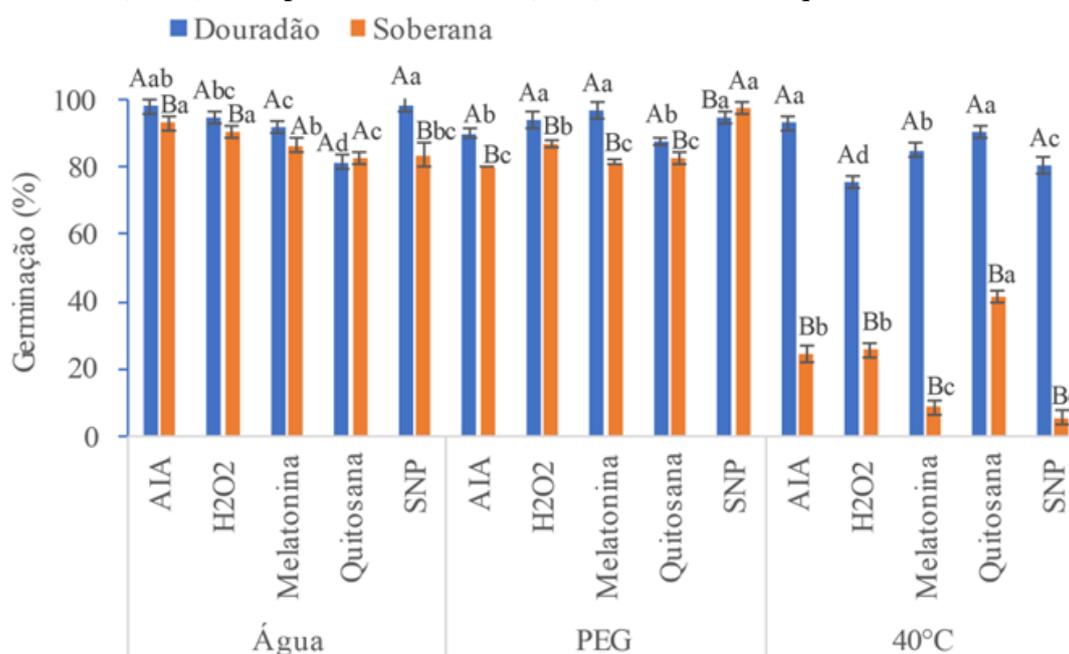
A intensidade e o efeito causado pelo estresse hídrico e calor na cultura do arroz variam em função do estágio de desenvolvimento da planta. O estresse térmico, no início da formação do grão, resultou na diminuição do número de espiguetas férteis e do rendimento de grãos de arroz (CAO et al., 2016); e o estresse hídrico associado ao estresse por calor durante a emergência e floração das panículas, reduziu o tamanho do pedúnculo e a fertilidade das espiguetas (BHATIA et al., 2017).

Quanto a porcentagem média de germinação (Figura 3), sob restrição hídrica, na presença de nitroprussiato de sódio foi verificado o maior resultado como condicionante, para a cultivar BRS Soberana. Em trabalhos com diferentes espécies foram observados os benefícios do uso do SNP, um doador de óxido nítrico, aplicado de forma exógena, podendo citar a quebra de dormência, aumento da germinação e da velocidade de germinação, além de tolerância a situações de estresses (ATAÍDE et al., 2015; KAISER et al., 2016; PIRES et al., 2016; SILVA et al., 2019). Para a cultivar Douradão o H₂O₂ e melatonina proporcionaram maior germinação, não apresentando diferenças entre eles. Ao contrário, para condição de germinação em água, o SNP apresentou melhores resultados para cultivar Douradão; em sementes da cultivar BRS Soberana houve os maiores valores de germinação quando as sementes foram condicionadas com AIA e H₂O₂.

O comportamento dos genótipos para a mesma condição de germinação e mesma solução condicionante variou (Figura 3). Para condição de restrição hídrica, apenas o nitroprussiato de sódio foi capaz de elevar a porcentagem média de germinação das sementes da cultivar BRS Soberana em níveis superiores a cultivar Douradão. Tal resultado, reforça a

importância do uso de SNP para elevar a germinação semente de cultivares, sob condição de restrição hídrica. Para a condição normal, a germinação das sementes da cultivar Douradão foi superior para todos os condicionantes.

Figura 3- Germinação de sementes de arroz, em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C), submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Analisando os resultados de germinação para altas temperaturas (Figura 3), houve diferença no comportamento das cultivares (Figura 3). Observou-se valores superiores de germinação para sementes da cultivar Douradão em todas as soluções condicionantes, reafirmando a sensibilidade da cultivar BRS Soberana a altas temperaturas.

Quanto ao fator condicionante, em temperatura alta, quando da utilização de quitosana observa-se melhor resultado para a cultivar BRS Soberana. Ressalta-se que a quitosana vem sendo bastante estudada por ser um biopolímero natural, biodegradável e atóxico, possuindo bastante interesse para sua utilização na agricultura. Sabe-se que em relação a indução de respostas de defesa em plantas, esse biopolímero atua no estímulo ao desencadeamento de mecanismos estruturais de resistência e mecanismos bioquímicos, como a produção de

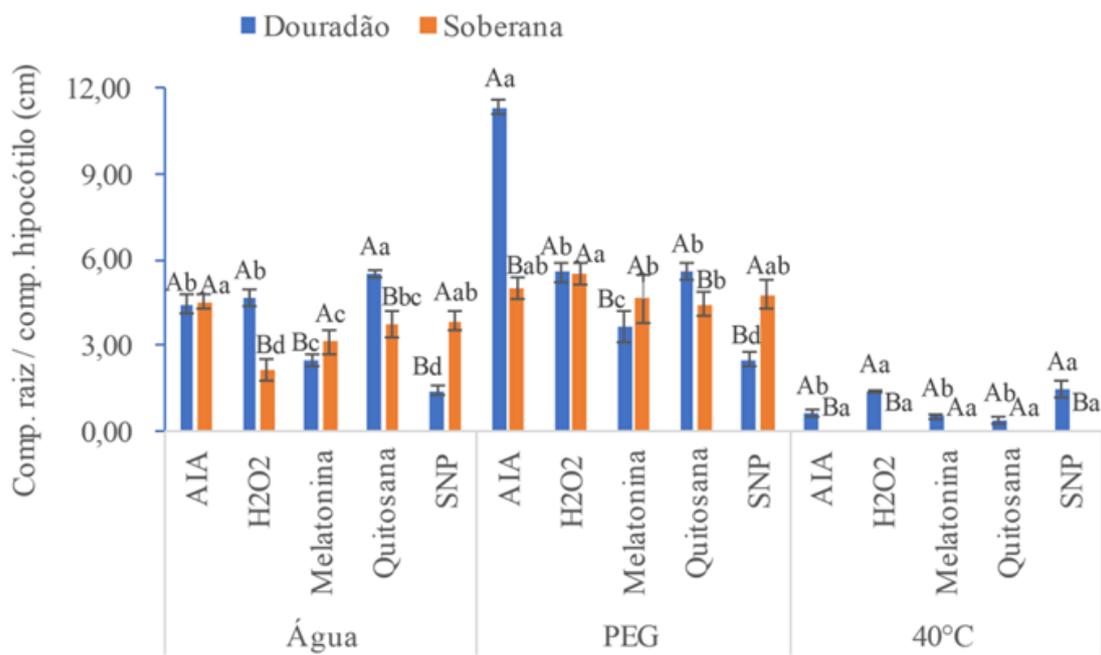
fitoalexinas e proteínas-RP (CAVALCANTI et al., 2005; LIMA et al., 2021). Para cultivar Douradão, além da quitosana, em sementes condicionadas com AIA também houve elevado valor de germinação.

A razão raiz/parte aérea em uma planta está relacionada com o acúmulo de carboidratos e açúcares solúveis no sistema radicular. Dessa forma a maior razão raiz/ parte aérea é em função de um maior acúmulo de reservas na radícula (XU *et al.*, 2015).

Nesse sentido, a relação comprimento da raiz e comprimento do hipocótilo (Figura 4), em plântulas sob restrição hídrica, foi maior quando as sementes foram condicionadas com H₂O₂ para a cultivar BRS Soberana. Para a cultivar Douradão, a razão foi maior para sementes condicionadas com AIA. Em estudos sobre a relação do estresse hídrico ao crescimento radicular, tem sido atribuído um maior crescimento radicular em detrimento da parte aérea à plantas tolerantes a situação de estresse; nesse sentido as plantas teriam maior capacidade de absorção de água no solo e menor perda por evapotranspiração (THOMAS et al., 2020; WU; DUNCAN; MA, 2017). Contudo, o equilíbrio entre raiz e parte aérea é importante para que as plântulas se desenvolvam e possam dar origem a plantas vigorosas.

Comparando as cultivares, em condição de restrição hídrica, para a Douradão esta razão foi superior à Soberana quando sementes foram condicionadas com AIA e quitosana, inferior para melatonina e SNP e as cultivares não diferiram entre si para o H₂O₂. Em condição normal, a razão foi maior com o uso de quitosana e menor com SNP para a cultivar Douradão. Para Soberana, a maior razão foi com o uso de AIA e menor quando condicionadas com peróxido de hidrogênio (Figura 4).

Figura 4- Razão entre comprimento de raiz e hipocótilo de plântulas de arroz, produzidas no teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C), submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Em condição de alta temperatura, a relação comprimento de raiz e hipocótilo (Figura 4), na cultivar BRS Soberana, não houve diferenças entre as soluções. Para a cultivar Douradão, a razão foi maior para sementes condicionadas com H₂O₂ e SNP, sendo as outras soluções com valores inferiores a esse e iguais entre si. Comparando as cultivares, sob 40°C, a cultivar Douradão apresentou razão superior a Soberana para sementes condicionadas com AIA, H₂O₂ e SNP, e as cultivares não diferiram entre si para melatonina e quitosana.

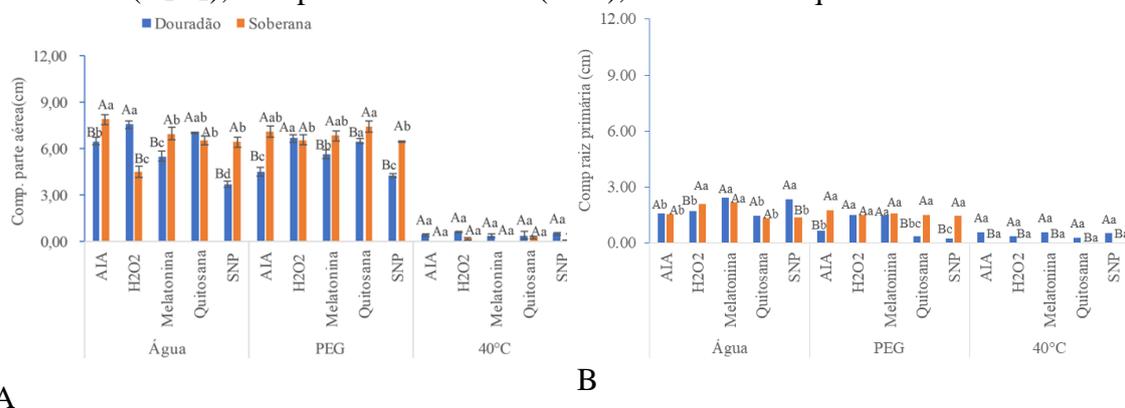
De acordo com os resultados encontrados para o comprimento da parte aérea (Figura 5A), verificou-se que sob o estresse hídrico, para a cultivar Soberana houve valores superiores de comprimento para todas as soluções, exceto H₂O₂ em que as cultivares não diferiram entre si.

Quanto ao fator agente condicionante, em condição de estresse hídrico, o maior comprimento da parte aérea foi observado em plântulas provenientes de sementes condicionadas com H₂O₂ e quitosana para a cultivar Douradão e quitosana para Soberana (Figura 5A). A quitosana é um biopolímero de grande interesse para a agricultura, pois aumenta

a resposta fisiológica e atenua o efeito adverso de estresses abióticos através da via de transdução de estresse por meio de mensageiro(s) secundário(s). O tratamento com esse biopolímero estimula a taxa fotossintética, fechamento estomático através da síntese de ABA; aumenta as enzimas antioxidantes através das vias de sinalização do óxido nítrico e do peróxido de hidrogênio e induz a produção de ácidos orgânicos, açúcares, aminoácidos e outros metabólitos que são necessários para o ajuste osmótico, sinalização de estresse e metabolismo energético sob estresse, além formar complexos com metais pesados (HIDANGMAYUM et al., 2019). Por isso, a quitosana mostra-se uma boa alternativa e vem alcançando bons resultados no condicionamento de sementes, podendo aumentar o crescimento e desenvolvimento das plantas. A sua utilização transforma positivamente várias características, como aumento na altura de plantas, número de ramificações da parte aérea, número de folhas, área foliar, atributos de biomassa (MONDAL et al., 2013).

Quanto aos resultados encontrados para o comprimento da parte aérea, sob temperatura elevada (Figura 5A), verificou-se que com o estresse as cultivares não diferiram entre si. Além disso, as soluções não influenciaram o comprimento da parte aérea para ambas as cultivares. Para sementes germinadas em água, o maior comprimento foi observado em sementes condicionadas com H₂O₂ para cultivar Douradão e AIA para Soberana (Figura 5A).

Figura 5- Comprimento da parte aérea (A) e raiz primária (B) de plântulas de arroz, produzidas no teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C), submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



A

B

Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Para o comprimento de raiz (Figura 5B), observa-se que nenhum dos agentes condicionantes influenciou no comprimento da raiz na cultivar Soberana, em condição de restrição hídrica. Para a cultivar Douradão, o menor comprimento foi apresentado em sementes condicionadas com SNP e maior H_2O_2 e melatonina.

Para potencializar o contato do sistema radicular com o solo e garantir uma absorção efetiva de água pelas raízes, são emitidos pelos radiculares que aumentam a superfície de contato e a capacidade absorção. Em condição de restrição hídrica, à medida que o solo seca, aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas (SANTOS; CARLESSO, 1998), sendo mais difícil as plantas absorverem água, estimulando o sistema radicular para zonas mais úmidas e profundas do solo (PIMENTEL, 2004).

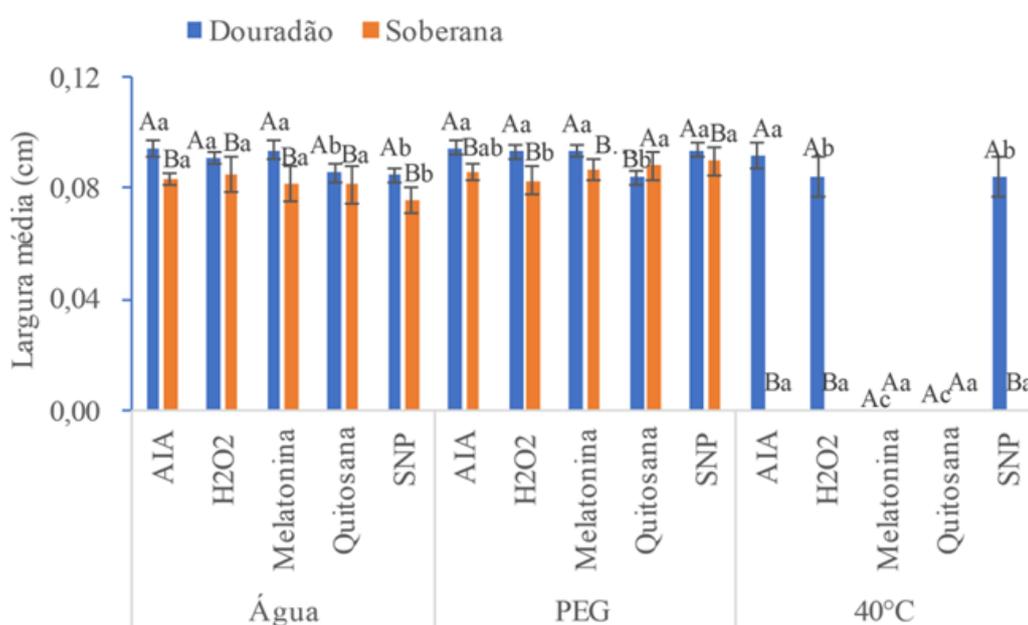
O arroz de terras altas, em condição normal, possui um sistema radicular raso que absorve nutrientes da camada superior do solo. Em condições de déficit hídrico, são necessárias plantas com um sistema radicular robusto e mais profundo, capaz de absorver água e nutrientes nas camadas mais profundas do solo. As raízes de arroz respondem a condição de estresse hídrico através do ajuste osmótico dentro das células da raiz, maior penetração da raiz no solo em virtude do aumento do seu comprimento, aumento da densidade da raiz e maior razão raiz-parte aérea (PANDA et al., 2021). Tal afirmação explica os resultados obtidos para o comprimento de raiz de plântulas dos genótipos, para a cultivar BRS Soberana houve maior comprimento de raiz para todas as soluções, com exceção dos agentes H_2O_2 e melatonina, os quais as duas cultivares não diferiram entre si. Ressalta que a cultivar BRS Soberana, foi previamente, caracterizada como suscetível ao estresse hídrico.

Para o comprimento de raiz (Figura 5B), observa-se que a nenhum dos agentes condicionantes influenciou no comprimento da raiz nas duas cultivares, em condição de alta temperatura. Para todas as soluções o comprimento da raiz da cultivar Douradão foi maior que a Soberana. Sementes germinadas sob condição de alta temperatura, embebem. Contudo o processo de crescimento embrionário e o estabelecimento da plântula são prejudicados (AKTER; ISLAM, 2017; MATHEUS; LOPES, 2009). MARINI et al. (2012) observaram redução no comprimento da parte aérea e das raízes das plântulas de arroz submetidas a temperaturas de 15; 30 e 35°C.

Sob estresse hídrico, na cultivar Douradão, a largura média da raiz primária (Figura 6) foi menor quando as sementes foram condicionadas com quitosana, sendo que os demais condicionantes apresentaram maiores valores do que este e não diferiram entre si. Para a cultivar BRS Soberana, a largura foi inferior com o uso de peróxido de hidrogênio e superior

com o uso de quitosana e SNP, os demais condicionantes tiveram valores intermediários e não apresentaram diferenças entre eles. Para todas as soluções, exceto quitosana, em plântulas da cultivar Douradão foi observada largura superior ao observado nas da Soberana em condição de estresse hídrico. Quando germinadas em água, a cultivar Douradão foi superior para todas as soluções.

Figura 6- Largura média da raiz primária de plântulas de arroz, produzidas no teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C), submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Em condição normal, em plântulas da cultivar Soberana, a largura da raiz foi menor quando as sementes foram condicionadas com nitroprussiato de sódio, sendo que nas outras soluções os valores foram maiores, mas não diferiram entre si. Para a cultivar Douradão, valores inferiores foram apresentados com uso de quitosana e SNP, as demais soluções foram superiores, sem diferirem entre si (Figura 4).

Sob estresse por temperatura alta, em plântulas da cultivar Douradão, a largura média da raiz primária (Figura 6) foi menor quando as sementes foram condicionadas com quitosana e melatonina e maior com AIA. Para a cultivar BRS Soberana, a largura da raiz não teve

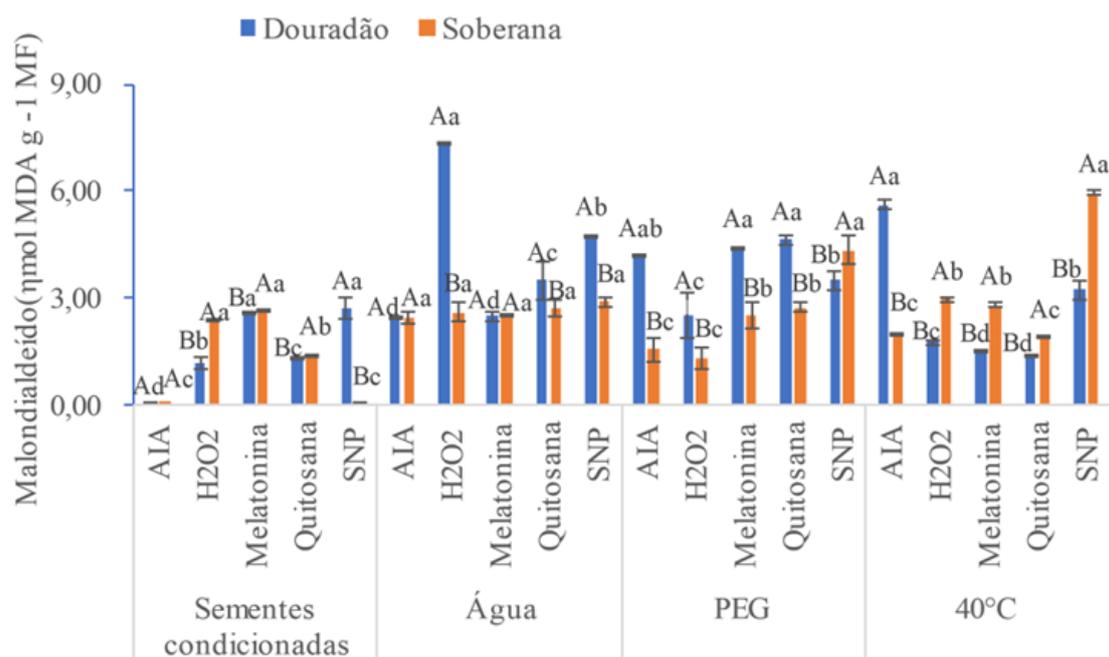
influência da solução condicionante, não apresentando diferenças entre as soluções. Para todas as soluções, as raízes de plântulas da cultivar Douradão apresentou largura superior à da Soberana, exceto em melatonina e quitosana, em condição de estresse.

Solos com déficit hídrico associado ao calor representam uma condição de estresse para a cultura do arroz de terras altas, levando à formação de espécies reativas de oxigênio, que são radicais livres altamente reativas. As EROs são produzidas normalmente durante os processos oxidativos biológicos, mas seus efeitos são incrementados sob condições estressantes em diversos sítios intracelulares como mitocôndrias, cloroplastos e peroxissomos (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020; LIMÓN-PACHECO; GONSEBATT, 2009). De fato, o que caracteriza a condição de estresse oxidativo é o aumento das EROS e/ou decréscimo da capacidade de eliminá-los ou neutralizá-las por parte dos compostos antioxidantes, que pode facilmente oxidar DNA, proteínas e lipídeos (KERCHEV; BREUSEGEM, 2022).

A peroxidação lipídica resulta em diversos produtos secundários que aumentam o dano oxidativo nas membranas, dentre eles o malondialdeído (MDA) é o principal e mais estudado produto da peroxidação lipídica (GUO; ZHANG; ZHANG, 2007; SACHDEV et al., 2021; TABALDI et al., 2009). Por meio da sua quantificação é possível estabelecer um parâmetro para o estresse oxidativo, pois o excesso de EROs tem como sintoma a peroxidação lipídica (KHOUBNASABJAFARI; ANSARIN; JOUYBAN, 2015; NAEEM et al., 2018) e consequente dano celular (COOKE; LEISHMAN, 2016; SHARMA et al., 2012).

Diante disso, ao observar os resultados de a quantificação de malondialdeído (Figura 7) em sementes condicionadas, na cultivar Douradão, o nitroprussiato de sódio e a melatonina resultaram em maior quantidade de MDA. Para cultivar BRS Soberana maiores valores foram observados quando da utilização de melatonina e peróxido de hidrogênio como solução condicionante.

Figura 7-Quantificação de malondialdeído (MDA) em sementes não submetidas ao teste de germinação (sementes condicionadas) e plântulas aos cinco dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Para a quantificação em plântulas aos cinco dias após a semeadura (Figura 7), na germinação com água, para a cultivar Soberana, a solução não influenciou a quantidade de MDA. Para Douradão, a maior quantidade foi observada com o uso de peróxido de hidrogênio. Por outro lado, o comportamento dos agentes condicionantes foi diferente para cada estresse. Na germinação com PEG, o nitroprussiato apresentou maior resultado, para cultivar BRS Soberana. O mesmo foi observado para plântulas da cultivar BRS Soberana provenientes de sementes germinadas em condição de estresse por calor. Enquanto para Douradão, em condição de restrição hídrica, o menor valor foi encontrado com o uso de H₂O₂ e os condicionantes melatonina e quitosana a maior atividade. Contudo, em condição de calor, o maior valor de malondialdeído, para cultivar Douradão, foi resultado do uso de ácido indolacético.

Altos valores de malondialdeído encontrados em sementes e plântulas submetidas às condições estressantes, como seca e temperaturas extremas, indicam que tal condição causou estresse durante a produção dessas sementes e este permaneceu nas plântulas oriundas das

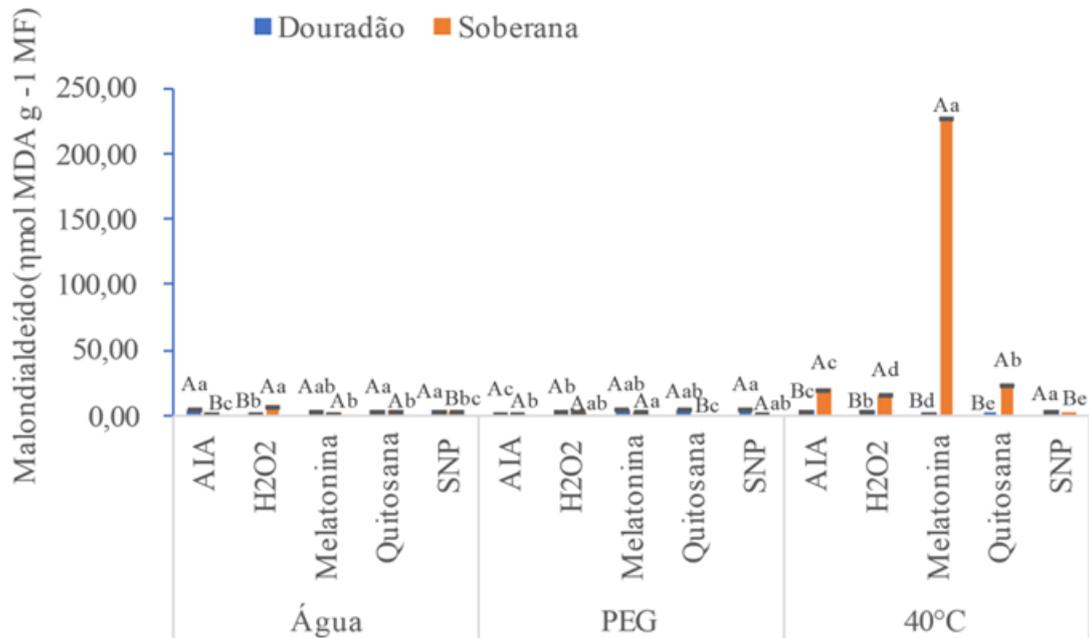
mesmas. Os lipídeos são os principais componentes da membrana plasmática das células e organelas. Com aumento dos níveis de EROs, as funções celulares normais são influenciadas e o estresse oxidativo exacerbado, resultando a peroxidação de lipídeos de membrana. O efeito final desse estresse é a diminuição da fluidez e um aumento na permeabilidade da membrana (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020), além de gerar subprodutos tóxicos (SCHWEMBER; BRADFORD, 2010).

Comparando o comportamento dos genótipos aos cinco dias, no estresse hídrico, a cultivar Douradão apresentou maior valor para todos os condicionantes com exceção do SNP. Em condição normal, o mesmo foi observado apenas para as soluções de peróxido de hidrogênio, quitosana e nitroprussiato de sódio; para as outras soluções as cultivares não diferiram entre si. Já em condição de estresse por calor, a cultivar Soberana apresentou maior valor de malondialdeído em todas as soluções, com exceção do AIA onde a quantidade de MDA para outra cultivar foi maior. (Figura 7).

Para a quantificação de malondialdeído na contagem final (Figura 8), sob restrição hídrica, a cultivar Douradão teve maior valor com o uso de quitosana e SNP, para os outros condicionantes não houve diferença no comportamento das cultivares. Na germinação com água, as cultivares diferiram entre si com o uso de AIA, SNP e peróxido de hidrogênio, tendo a cultivar Douradão valor superior nas duas primeiras soluções. Com 40°C, as cultivares diferiram entre si, sendo a cultivar Soberana com maior quantidade de MDA em todas as soluções, exceto SNP na qual a Douradão teve maior valor.

O condicionante influenciou a quantificação de MDA em plântulas aos 14 dias após a semeadura (Figura 8) em todas as condições estresse. Em plântulas da cultivar Douradão os maiores valores de MDA foram observados com uso de melatonina em condição de estresse hídrico e SNP em estresse por calor. Já para cultivar BRS Soberana os valores de malondialdeído foram maiores com a utilização melatonina para as duas condições de estresse. O malondialdeído é o último produto da peroxidação de ácidos graxos insaturados nos fosfolipídios e é responsável por danos de membrana celular (SHARMA et al., 2012). Dessa forma, a peroxidação de membranas plasmáticas causa extravasamento do conteúdo celular, rápida dessecação e a morte celular (FOYER; NOCTOR, 2000).

Figura 8-Quantificação de malondialdeído (MDA) em plântulas de arroz aos 14 dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



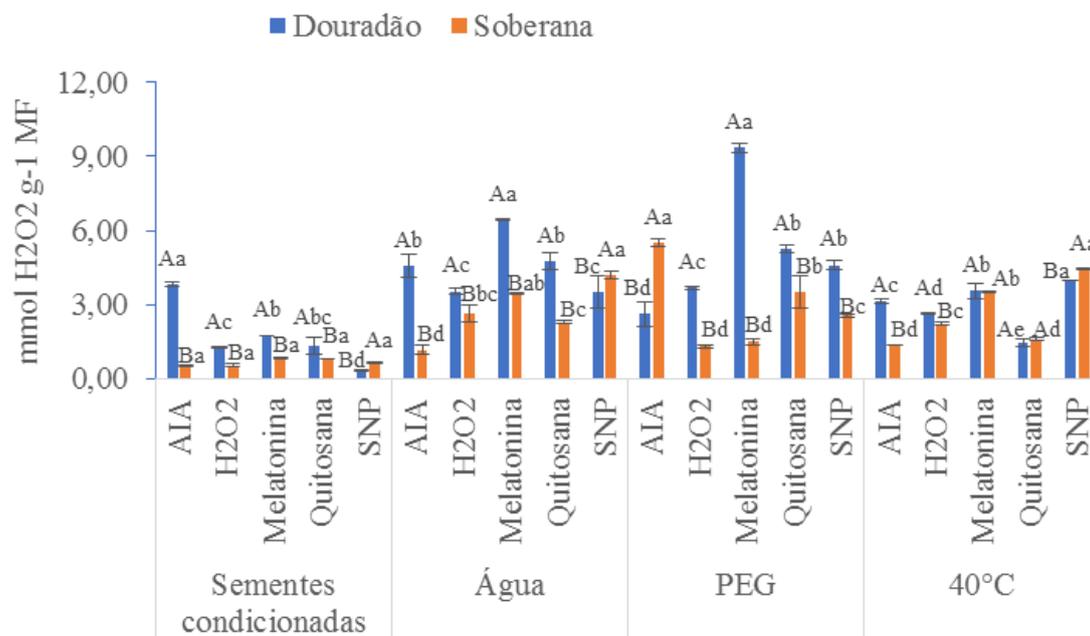
Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

O peróxido de hidrogênio em baixas concentrações desencadeia a tolerância a diversos estresses bióticos e abióticos, atuando como molécula sinalizadora. Contudo em altas concentrações, apesar de pouco tóxica, possui capacidade de atravessar membranas, gerando danos em diversos compartimentos celulares (WEISZ; GROSS; PAKRASI, 2017) e, sendo assim fonte de risco oxidativo a proteínas, ao DNA da planta e leva a peroxidação de lipídios (WASZCZAK; CARMODY; KANGASJÄRVI, 2018). Logo, a quantificação dessa forma de EROs é de extrema importância para entender estresse oxidativo.

A quantificação de peróxido de hidrogênio em sementes condicionadas (Figura 9) da cultivar Douradão foi maior quando da utilização do condicionante AIA e menor para SNP. Para a cultivar Soberana, não houve efeito do condicionante na quantificação de peróxido de hidrogênio. Com exceção do SNP, em todos os condicionantes para a cultivar Douradão houve valores superiores de peróxido de hidrogênio comparadas a cultivar BRS Soberana.

Figura 9-Quantificação de peróxido de hidrogênio em sementes não submetidas a teste de germinação (sementes condicionadas) e plântulas aos cinco dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Comparando os resultados obtidos na quantificação de H₂O₂ em sementes condicionadas e a quantificação do H₂O₂ aos cinco dias (Figura 9), em plântulas desenvolvidas em condição de estresse hídrico, os maiores valores foram encontrados quando as sementes foram condicionadas com melatonina, para a cultivar Douradão, e com AIA para a cultivar Soberana. Nessa mesma condição de germinação, o menor valor de peróxido de hidrogênio foi com o uso de AIA para a cultivar Douradão e peróxido de hidrogênio e melatonina para a cultivar Soberana. Entre as cultivares, sob estresse hídrico, a quantificação de peróxido de hidrogênio foi maior para a cultivar Douradão em todas as soluções, exceto para o AIA. Quando as sementes foram submetidas ao estresse por temperatura alta, aos cinco dias, a quantificação de peróxido de hidrogênio foi maior quando foi utilizada a solução de nitroprussiato de sódio, para as duas cultivares. Nessa condição, o menor valor para a cultivar Douradão foi com o uso de quitosana e para Soberana com AIA e quitosana. Comparando as cultivares, com 40°C, nas

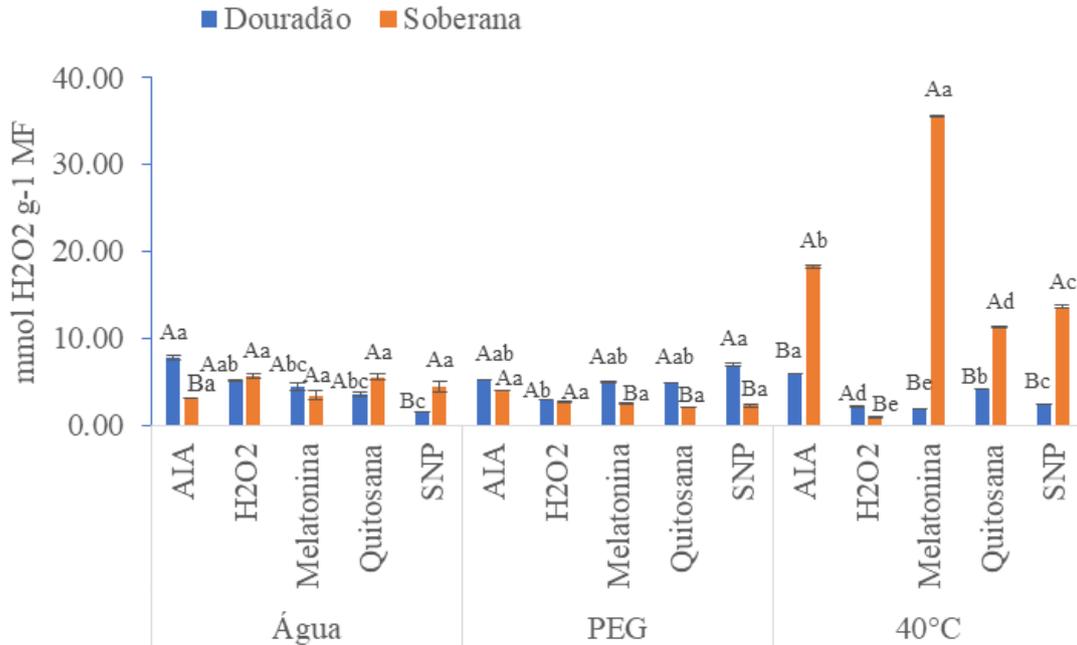
soluções de AIA e peróxido de hidrogênio para a cultivar Douradão houve maior quantidade de H_2O_2 ; com o uso de SNP a cultivar Soberana foi superior e para os demais condicionantes as cultivares não diferiram entre si.

Em plântulas provenientes de sementes não estressadas (germinadas em água), a maior valor de peróxido de hidrogênio foi com o uso de melatonina para a cultivar Douradão, e SNP para a cultivar Soberana. Comparando os genótipos, nessa condição de germinação, para as plântulas da cultivar Douradão houve maior quantidade de peróxido de hidrogênio em todas as soluções, exceto para SNP. (Figura 9).

Aos 14 dias após a semeadura, os valores de peróxido de hidrogênio (Figura 10), em condição de restrição hídrica, para a cultivar Douradão, foram menores quando as sementes foram condicionadas com a mesma substância, sendo maior quando condicionado com SNP e para as demais substâncias não diferenças entre si. Para a cultivar Soberana, não houve efeito do condicionante nos valores de peróxido de hidrogênio. Para a cultivar Douradão houve maior quantidade de peróxido de hidrogênio quando as sementes foram condicionadas em soluções de melatonina, quitosana e SNP; para as demais soluções as duas cultivares não diferiram entre si.

Sob alta temperatura, a quantidade de peróxido de hidrogênio foi menor quando as sementes foram condicionadas com a mesma substância e maior com o uso de melatonina, para a cultivar BRS Soberana. Ao contrário, para a cultivar Douradão, o uso de melatonina resultou em menor quantidade de peróxido, enquanto o maior valor foi resultado do uso do ácido indolacético. Nesta condição, comparando os genótipos, apenas com o uso de peróxido de hidrogênio como condicionante, foi observado maior valor da mesma substância em condição de estresse, para cultivar Soberana.

Figura 10-Quantificação de peróxido de hidrogênio em plântulas de arroz aos 14 dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

As enzimas do sistema antioxidante atuam no controle das espécies reativas de oxigênio produzidas naturalmente nos seres vivos e são extremamente importantes na proteção dos tecidos vegetais sob condições de estresse, pois são capazes desintoxicar o excesso de EROs produzidos nas plantas. Estão incluídas nesse sistema, a ascorbato peroxidase (APX), a catalase (CAT) e a superóxido dismutase (SOD) (KERCHEV; BREUSEGEM, 2022). Dessa forma, analisar a expressão dessas enzimas no momento do estresse torna-se uma importante ferramenta para se entender a extensão do estresse oxidativo e as diferentes reações que cada genótipo apresenta naquela situação, além de atuação das moléculas utilizadas como sinalizadores em cada estresse.

As peroxidases são enzimas capazes de oxidar vários substratos na presença de H₂O₂ ou de hidroperóxidos orgânicos. A APX é uma peroxidase que utiliza o ascorbato como doador de elétrons (MARUTA et al., 2016). Ela se localiza principalmente nos cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos, podendo estar associada às mitocôndrias (OZYIGIT et al., 2016). Por estar

presentes em diversos compartimentos da célula, além de diminuir o acúmulo de peróxido de hidrogênio ela cria uma barreira de defesa ao estresse oxidativo em organelas importantes como o cloroplasto (ZHANG et al., 2013), por isso o aumento na atividade da enzima sugere uma tolerância ao estresse.

Com isso, ao observar os resultados obtidos na quantificação de ascorbato peroxidase (Figura 11), nota-se que os condicionantes proporcionaram diferença na atividade da enzima nas sementes após o condicionamento. Para a cultivar BRS Soberana o maior valor de atividade da enzima foi observado em sementes condicionadas com AIA. Enquanto para a cultivar Douradão, uma maior atividade foi observada em sementes condicionadas com AIA e melatonina. Comparando o comportamento dos genótipos, houve diferença para sementes condicionadas com melatonina, em sementes da cultivar Douradão maior atividade enzimática foi observada.

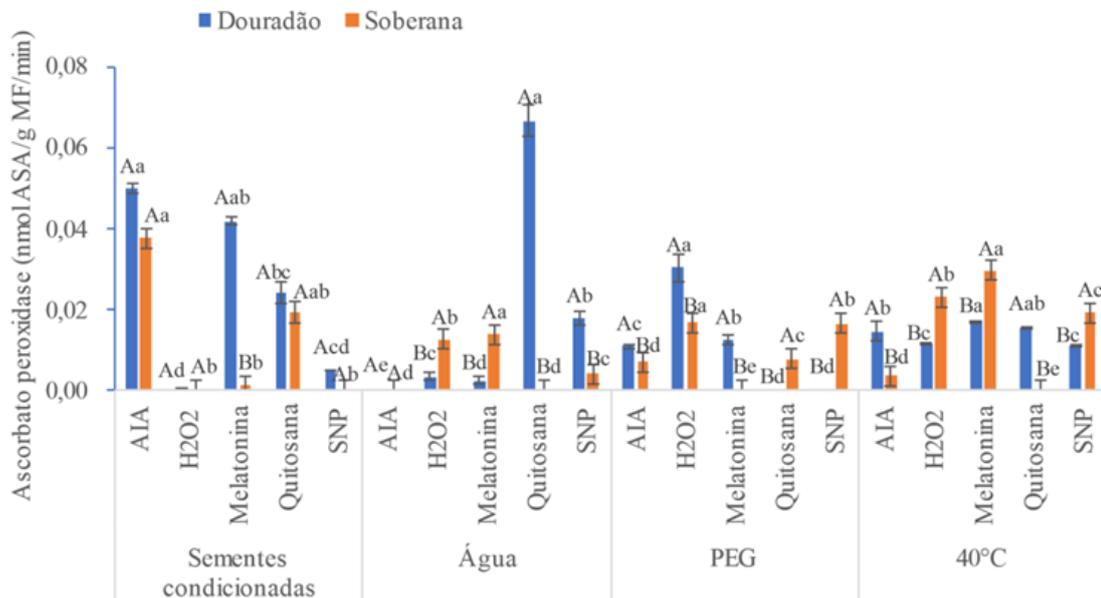
Comparando os resultados obtidos na quantificação de APX em sementes condicionadas e a quantificação da enzima aos cinco dias (Figura 11), em plântulas produzidas em condição de estresse hídrico, para os dois genótipos, a atividade de ascorbato peroxidase foi maior com a utilização de H_2O_2 . Sohag et al. (2020) observaram que plântulas de arroz submetidas ao déficit hídrico que tiveram alta atividade da APX apresentaram maior tolerância ao estresse hídrico.

Em condições favoráveis, o H_2O_2 participa de vários processos fisiológicos durante todas as fases de desenvolvimento das plantas, tais como: carbonilação de proteínas específicas e ativação de enzimas chave durante a germinação de sementes (BARBA-ESPÍN et al., 2011; ISHIBASHI et al., 2017), aceleração do crescimento de raízes primárias e laterais (HERNÁNDEZ-BARRERA et al., 2015) e fechamento estomático (GE et al., 2015). Contudo, em condições de estresses abióticos, em diferentes estudos tem sido observado o papel central do H_2O_2 nas vias de sinalização melhorando as respostas das plantas em condições de seca (ISHIBASHI et al., 2011), salinidade (BAGHERI; GHOLAMI; BANINASAB, 2019), metais pesados (HASANUZZAMAN et al., 2017) e encharcamento (ANDRADE et al., 2018).

Por outro lado, plântulas produzidas em condição normal aos cinco dias após a semeadura, a maior atividade de APX foi observada com a utilização de quitosana para a cultivar Douradão e melatonina para a cultivar BRS Soberana. Comparando o fator cultivar, quando submetidas ao estresse hídrico, a cultivar BRS Soberana apresentou resultado superior a cultivar Douradão quando as sementes foram condicionadas com quitosana e SNP. Quando colocadas para germinar em água, valores superiores foram observados para a cultivar Soberana

quando as sementes foram condicionadas em solução de H₂O₂ e melatonina; e as duas cultivares não diferiram entre si, quando foram condicionadas com AIA (Figura 11).

Figura 11- Quantificação de ascorbato peroxidase em sementes não submetidas a teste de germinação (sementes condicionadas) e plântulas aos cinco dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

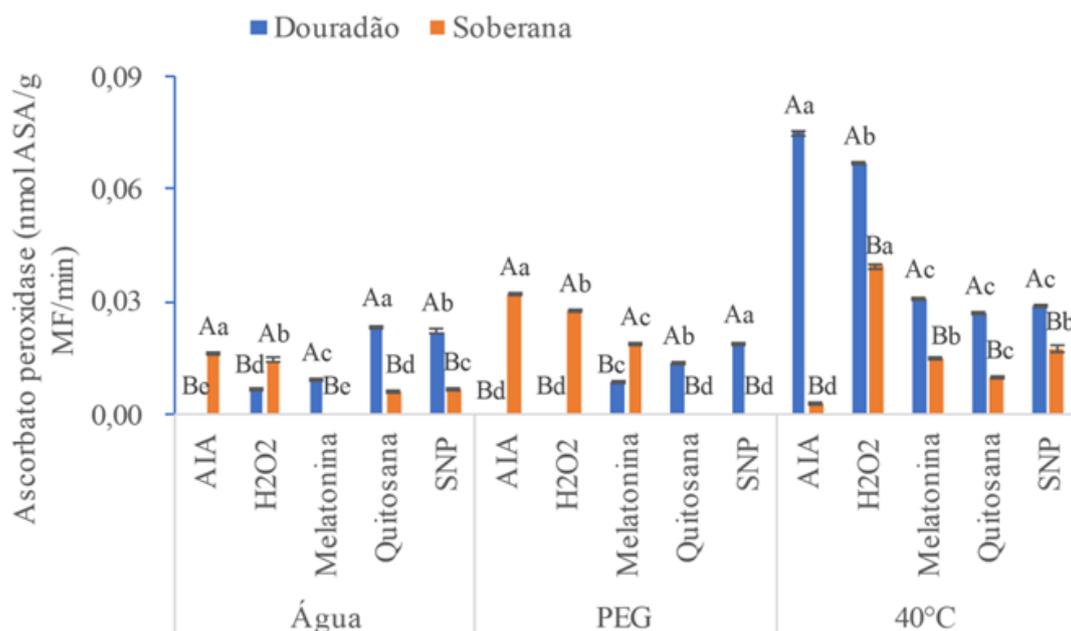
A quantificação de ascorbato peroxidase, em plântulas submetidas ao calor, aos cinco dias (Figura 11) foi maior com a utilização da melatonina como condicionante, para as duas cultivares. A melatonina é descrita como promotora de tolerância a estresses em plantas, uma vez que sua síntese nas plantas, quando estas estão expostas a estresses bióticos e abióticos, limita os estresses oxidativos, pela indução da expressão de genes relacionados a estresses, pela redução da peroxidação lipídica e dos níveis de H₂O₂, e crescimento do sistema antioxidante enzimático, ou mesmo quelando metais pesados (REITER et al., 2015; ZHANG et al., 2014a).

A atividade da enzima entre as cultivares variou conforme a solução utilizada, em ambas condições de germinação. Sob alta temperatura para a cultivar BRS Soberana houve maior valor de APX para todas as soluções, com exceção da Quitosana. Em condição normal, para as soluções de quitosana e SNP a cultivar Douradão apresentou maior atividade de APX, para o

AIA não houve diferença entre as cultivares e os demais condicionantes a cultivar BRS Soberana apresentou maior valor (Figura 11).

Em relação a atividade de APX, aos 14 dias, em plântulas sob restrição hídrica (Figura 12), a quantificação foi maior em plântulas cujas sementes foram condicionadas com SNP, para cultivar Douradão. Ao contrário, para cultivar BRS Soberana, a quantificação da enzima foi maior para plântulas provenientes do tratamento com AIA. Houve diferenças nos valores para as duas cultivares. Em sementes plântulas da cultivar BRS Soberana houve maior expressão de APX, comparada à Douradão, nas soluções de AIA, H₂O₂ e melatonina, sob condição de déficit hídrico. O mesmo não foi observado para condição normal (Figura 12).

Figura 12- Quantificação de ascorbato peroxidase em plântulas de arroz aos 14 dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

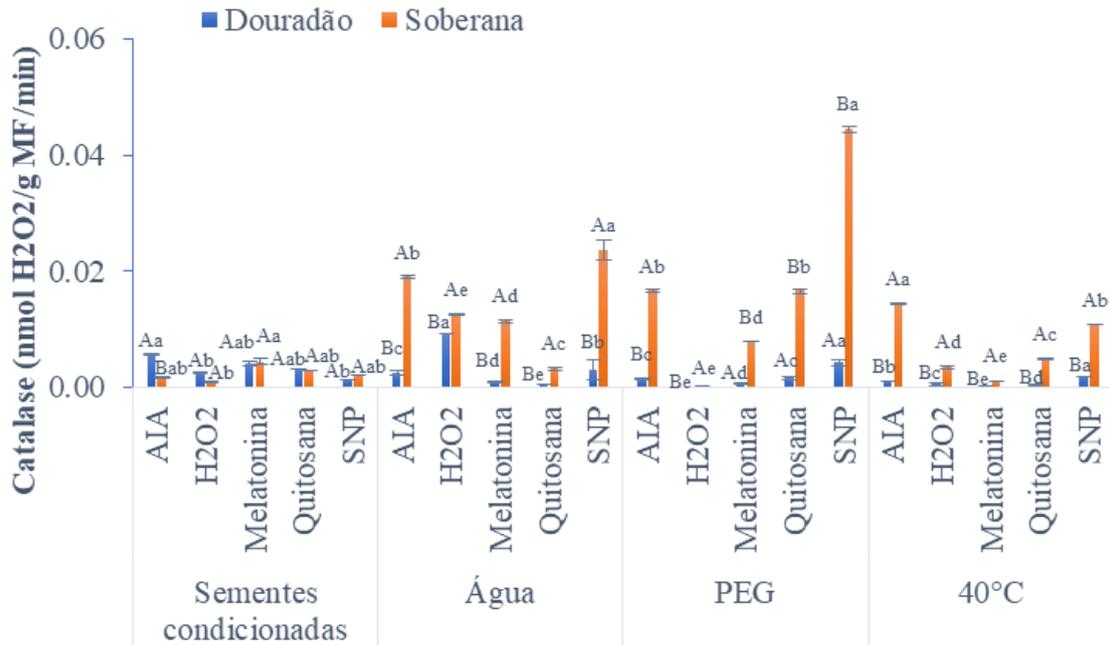
Quanto à quantificação de APX, em plântulas submetidas ao calor, aos 14 dias após a semeadura (Figura 12), para a cultivar Douradão o maior valor foi encontrado em plântulas cujas sementes foram condicionadas com a solução de ácido indolacético, enquanto o maior

valor para a cultivar BRS Soberana foi observado em plântulas cujas sementes foram condicionadas com a de H₂O₂. Comparando o comportamento das duas cultivares em cada solução para uma mesma condição de germinação, observa-se que sob alta temperatura para cultivar Douradão foi observado o maior valor de ascorbato peroxidase em plântulas provenientes de sementes submentes à solução com diferentes condicionantes.

Semelhante à APX, a catalase integra ao grupo de enzimas peroxidases que atuam neutralizando o H₂O₂ em diversos processos fisiológicos. Presente no peroxissomos e mitocôndrias, a catalase é a principal enzima responsável por eliminar o excesso de peróxido de hidrogênio produzido pelas células, transformando o H₂O₂ em água e O₂ molecular (GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020; SHARMA et al., 2012).

Para a quantificação da catalase nas sementes condicionadas (Figura 13), houve diferença no comportamento das cultivares para o condicionante AIA. Nesta condição, a atividade enzimática da cultivar Douradão foi maior. Comparando o fator condicionante, houve diferença na atividade da enzima catalase em cada genótipo. Para a cultivar Douradão a maior expressão da catalase foi em sementes condicionadas com ácido indolacético e para cultivar BRS Soberana em sementes condicionadas com melatonina.

Figura 13-Quantificação de catalase em sementes não submetidas a teste de germinação (sementes condicionadas) e plântulas aos cinco dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Comparando os resultados de atividade de catalase obtidos nas sementes condicionadas e a atividade da enzima aos cinco dias (Figura 13), em plântulas provenientes de sementes germinadas sob estresse hídrico houve maior atividade de CAT quando condicionadas com nitroprussiato de sódio, para os dois genótipos.

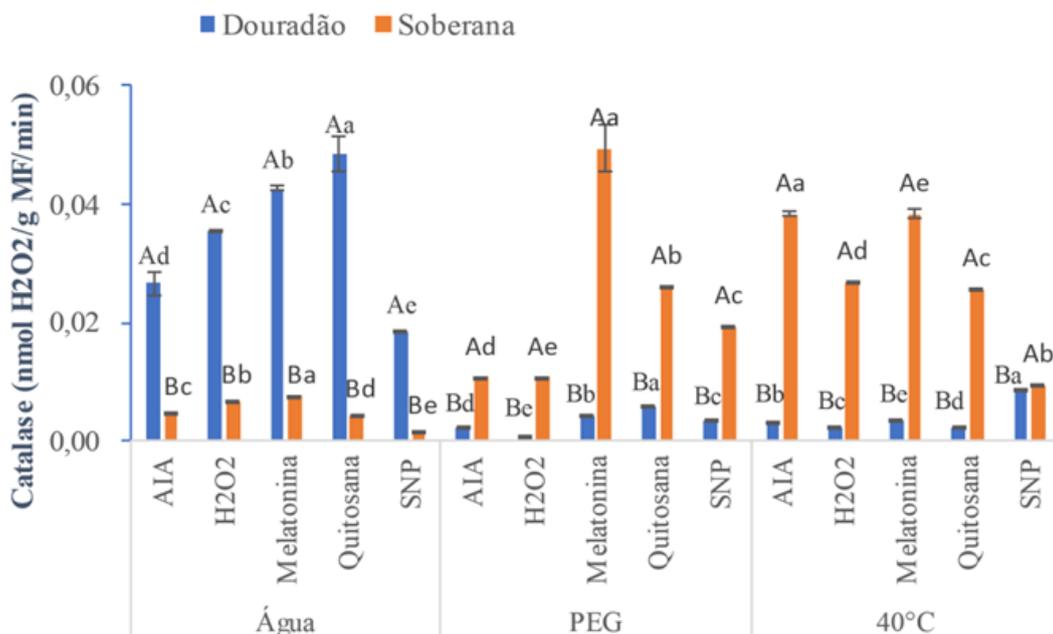
Quando submetidas a condição normal, a atividade foi maior, para a cultivar Soberana, com o uso de nitroprussiato e H₂O₂ para a cultivar Douradão. Comparando a atividade da enzima no fator cultivar, tanto para restrição hídrica quanto condição normal, para todos os condicionantes a cultivar BRS Soberana apresentou maior atividade da enzima (Figura 13).

A quantificação de catalase em plântulas originadas de sementes germinadas em alta temperatura (Figura 13) foi maior quando foi utilizado o nitroprussiato de sódio para a cultivar Douradão e AIA para a cultivar BRS Soberana. Para todas as soluções condicionantes para a cultivar BRS Soberana foi observada maior atividade de catalase, comparada a observada para

a cultivar Douradão, indicando maior estresse pela cultivar BRS Soberana e por sua vez maior suscetibilidade. O nitroprussiato de sódio, um doador de óxido nítrico, aumenta a atividade da catalase que, por sua vez, minimiza o estresse oxidativo causado pelo déficit hídrico. O óxido nítrico é uma molécula mensageira e, em geral, a resposta ao estresse ocorre em virtude da sua interação com fito-hormônios (DU et al., 2015; FAN et al., 2014; SANZ et al., 2015).

Quando analisado o fator cultivar aos 14 dias após a semeadura (Figura 14), sob déficit hídrico, para todas as soluções para a cultivar BRS Soberana houve maior atividade de catalase, reafirmando a maior sensibilidade a seca.

Figura 14- Quantificação de catalase em plântulas de arroz aos 14 dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Fonte: da autora (2022).

Em condição de déficit hídrico, sob o condicionamento em quitosana e melatonina houve maiores valores da enzima para a cultivar Douradão e BRS Soberana, respectivamente. Os mesmos resultados foram observados para a germinação em condição normal. Aos 40°C, o peróxido de hidrogênio resultou em maior atividade de catalase para a cultivar Douradão, enquanto para a cultivar BRS Soberana sob solução de AIA houve maior atividade (Figura 14).

A superóxido dismutase (SOD) pertence ao grupo das metaloenzimas. Possui três isoformas diferenciadas em função do metal presente no sítio ativo: cobre/zinco (Cu/Zn-SOD),

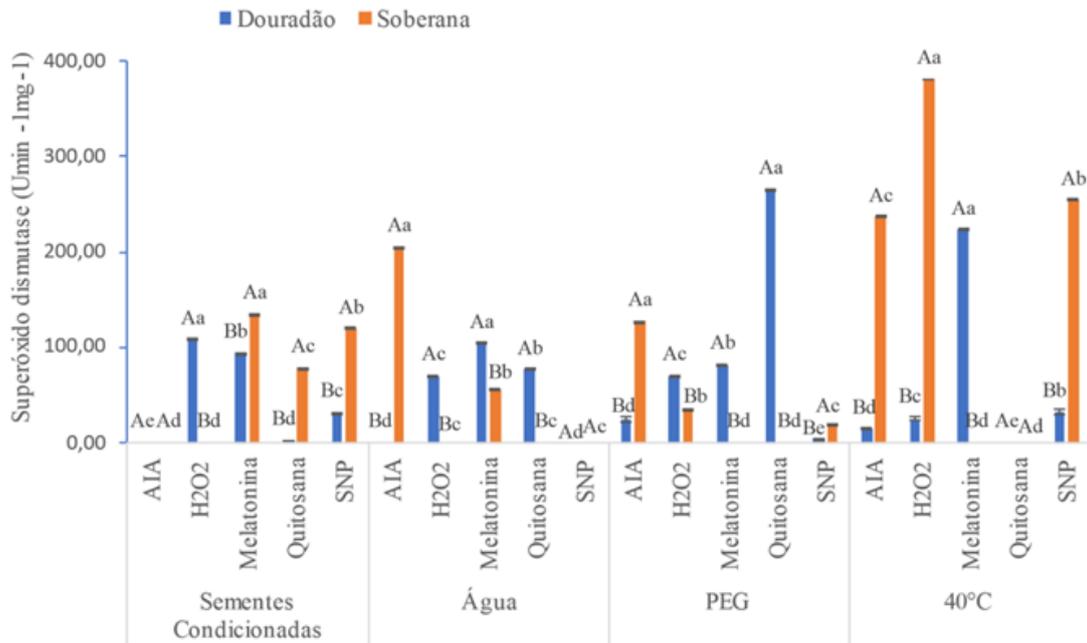
ferro (Fe-SOD) e manganês (Mn-SOD). Sua localização na célula também é diferenciada em função do metal, Cu/Zn-SOD são normalmente encontradas no citosol e nos cloroplastos, as Fe-SOD nos cloroplastos e Mn-SOD estão presentes nas mitocôndrias e peroxissomos. A SOD catalisa a dismutação do $\cdot\text{O}_2^-$ em H_2O_2 e O_2 , por isso ela constitui a primeira linha de defesa para a desintoxicação das plantas contra EROs ((GARCÍA-CAPARRÓS et al., 2020).

A atividade de superóxido dismutase em sementes condicionadas (Figura 15) foi maior em sementes condicionadas com H_2O_2 para a cultivar Douradão e melatonina para a cultivar BRS Soberana. Ao comparar o comportamento das cultivares em cada solução condicionante, a atividade da SOD em sementes da cultivar Soberana foi superior a observada em sementes da Douradão quando condicionadas com melatonina, SNP e quitosana.

Comparando os resultados encontrados para atividade de SOD em sementes e em plântulas aos cinco dias (Figura 15), a atividade desta enzima foi maior quando utilizou-se o ácido indolacético como condicionante para a cultivar BRS Soberana, tanto para sementes germinadas sob déficit hídrico quanto para germinadas em água. Por outro lado, para a cultivar Douradão, a condição de germinação influenciou na atividade da enzima, sendo em condição de déficit hídrico a maior atividade para o condicionante quitosana e em condição normal a melatonina. Ao analisar o comportamento dos genótipos em cada condicionante, observa-se que o condicionante e o estresse interferem na atividade de superóxido dismutase, em valores superiores para a cultivar Soberana em condição de déficit hídrico quando as sementes foram condicionadas com AIA e SNP.

Como já mencionado, a SOD é a primeira via de combate ao acúmulo de EROs nas células, pois ela inicia o processo de desintoxicação por meio da redução do radical superóxido em peróxido de hidrogênio (CHUNG, 2017). Dessa forma, é importante ressaltar que plantas com maior atividade de superóxido dismutase possuem maior proteção celular (MULLINEAUX; RAUSCH, 2007). Logo, plantas submetidas ao déficit hídrico com a atividade de SOD aumentada indica uma maior capacidade da planta em tolerar o estresse, já que os baixos índices do radical superóxido causam menos danos oxidativos às células, uma vez que sua toxidez é maior comparada ao peróxido de hidrogênio (LI et al., 2013).

Figura 15-Quantificação de superóxido dismutase em sementes não submetidas a teste de germinação (sementes condicionadas) e plântulas aos cinco dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

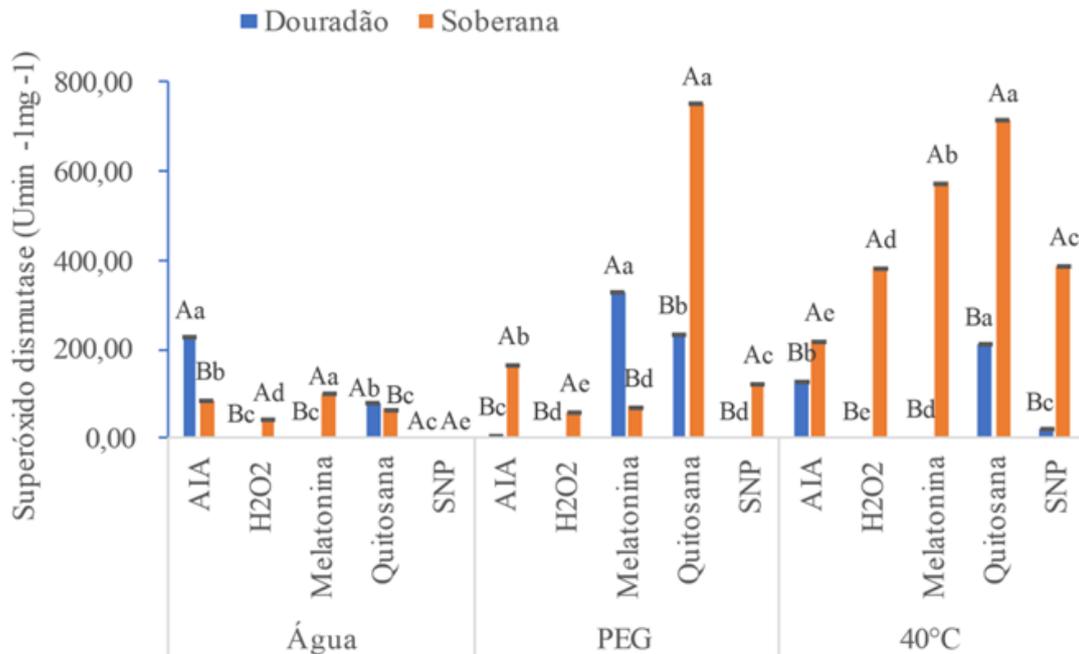
A atividade de superóxido dismutase em plântulas aos cinco dias após a semeadura (Figura 15) para temperatura alta, cultivar Douradão, foi maior com a utilização do condicionante melatonina. Já para cultivar BRS Soberana a maior atividade foi observada com o uso de H₂O₂. Gao et al. (2002), ao utilizar o H₂O₂ de forma exógena em *Cucumis sativus*, observaram que tal molécula contribuiu para o aumento na atividade das enzimas do sistema antioxidante, diminuindo a peroxidação lipídica e protegendo organelas, como os cloroplastos.

Comparando as cultivares, dentro de cada condição em que as sementes foram colocadas para germinar e para cada condicionante, houve diferenças na atividade de SOD. Em condição normal, apenas com o uso de AIA em plântulas da cultivar Soberana houve maior atividade que as da outra cultivar. Para 40°C, com o uso de quitosana as cultivares não diferiram entre si; com a melatonina a cultivar Douradão foi superior e para os demais condicionantes a atividade na cultivar BRS Soberana foi maior (Figura 15).

Aos 14 dias após a semeadura, a quantificação de SOD (Figura 16) em plântulas não estressadas foi maior quando as sementes foram condicionadas com AIA e melatonina para as cultivares Douradão e BRS Soberana, respectivamente. Em plântulas estressadas com calor a atividade de SOD foi maior com a utilização de quitosana para as duas cultivares. O aumento na atividade da SOD com o uso de quitosana, tem sido observada em alguns trabalhos (FAN et al., 2010; LEI et al., 2011), corroborando com os resultados obtidos neste estudo.

Em plântulas cujas sementes foram germinadas com PEG (Figura 16), a atividade da enzima foi maior quando da utilização da solução de melatonina e quitosana para as cultivares Douradão e BRS Soberana, respectivamente. Sob déficit hídrico, o uso da quitosana induz inúmeras respostas benéficas as plantas, como ativação do sistema de eliminação de EROs, condutância estomática aprimorada, maior crescimento de raízes. Contudo, o modo de ação dessa molécula no sistema vegetal não é totalmente elucidado e a heterogeneidade de preparo pode afetar as características físicas da quitosana (HIDANGMAYUM et al., 2019).

Figura 16-Quantificação de superóxido dismutase em plântulas de arroz aos 14 dias do teste de germinação em condição normal (água), em restrição hídrica (PEG) e em alta temperatura (40°C) submetidas ao condicionamento fisiológico nas soluções de ácido indolacético (AIA), peróxido de hidrogênio (H₂O₂), nitroprussiato de sódio (SNP), melatonina e quitosana.



Legenda: Médias seguidas por uma mesma letra, maiúscula entre cultivares (dentro de uma mesma condição de germinação) e minúscula entre as soluções condicionantes, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Fonte: da autora (2022).

Comparando o fator cultivar, é possível observar que a solução condicionante e a condição de germinação influenciam na expressão da enzima (Figura 16). Para a germinação com PEG, a cultivar Douradão foi superior a BRS Soberana apenas com uso de melatonina. Aos 40°C, observa para todas as soluções houve maior atividade em plântulas da cultivar BRS Soberana compara às plântulas da cultivar Douradão, indicando, como já mencionado, maior sensibilidade ao estresse à alta temperatura.

Os resultados obtidos para atividade de APX, SOD e CAT sugerem que as moléculas sinalizadoras atuam em rotas de indução a resposta ao estresse diferentes, sendo essas rotas ativadas ao longo do desenvolvimento da planta. Por isso, em cada fase de desenvolvimento, desde sementes até as plântulas aos 14 dias, a expressão da enzima em relação aos agentes condicionantes variou.

4 CONCLUSÕES

O condicionamento fisiológico minimiza os efeitos negativos da restrição hídrica e alta temperatura durante o processo de germinação de sementes e emergência de plântulas de arroz de terras altas.

O uso da quitosana é eficiente para minimizar os efeitos do estresse térmico da cultivar BRS Soberana, enquanto o nitroprussiato de sódio é eficaz no déficit hídrico, durante a germinação de semente e emergência de plântulas de arroz.

O condicionamento fisiológico com ácido indolacético resulta em tolerância ao estresse hídrico durante o processo de germinação de sementes e emergência de plântulas da cultivar Douradão.

Para a cultivar Douradão o condicionamento com AIA e quitosana permite a expressão do vigor de sementes de arroz de terras altas submetidas ao estresse térmico.

Ao longo do desenvolvimento da plântula (aos cinco e 14 dias após a semeadura) há variação na atividade das enzimas em função das moléculas sinalizadoras utilizadas.

As atividades da APX, CAT e SOD em sementes e plântulas de arroz variam com o genótipo e moléculas sinalizadoras utilizadas

REFERÊNCIAS

- ABID, M. et al. Seed osmopriming invokes stress memory against post-germinative drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Environmental and Experimental Botany**, v. 145, p. 12–20, 1 jan. 2018.
- ABREU, V. M. et al. Physiological performance and expression of isozymes in maize seeds subjected to water stress 1 Viviane Maria de Abreu 2 *, Édila Vilela de Resende. **Journal of Seed Science**, v. 36, n. 1, p. 040–047, 2014.
- AKTER, N.; ISLAM, M. R. Heat stress effects and management in wheat. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 37, n. 5, 1 out. 2017.
- ALMEIDA, A. DA S. et al. Protrusão da radícula e métodos para superação de dormência de sementes de trigo. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 3, p. 271–276, 11 nov. 2016.
- ALLOUI, H. et al. Germination and growth in control and primed seeds of pepper germination and growth in control and primed seeds of pepper as affected by salt stress. **Cercetări Agronomice în Moldova**, v. XLVII, n. 3, 2014.
- ANAND, U. et al. metabolites A Comprehensive Review on Medicinal Plants as Antimicrobial Therapeutics: Potential Avenues of Biocompatible Drug Discovery. **Metabolites**, v. 9, p. 258, 2019a.
- ANAND, U. et al. A Comprehensive Review on Medicinal Plants as Antimicrobial Therapeutics: Potential Avenues of Biocompatible Drug Discovery. **Metabolites**, v. 9, p. 258, 2019b.
- ANDRADE, C. A. . et al. Hydrogen peroxide promotes the tolerance of soybeans to waterlogging. **Scientia Horticulturae**, v. 232, p. 40–45, 2018.
- ARAÚJO, P. C. et al. Condicionamento fisiológico e vigor d sementes d maxixe. **Journal of Seed Science**, v. 33, n. 3, p. 482–489, 2011.
- ARIF, M. et al. Evaluating the impact of osmopriming varying with polyethylene glycol concentrations and durations on soybean. **International Journal of Agriculture and Biology**, v. 16, n. 2, p. 359–364, 2014.
- ARMONDES, K. A. P. et al. Condicionamento osmótico e desempenho de sementes de repolho com diferentes níveis de vigor. **Horticultura Brasileira**, v. 34, n. 3, p. 428–434, 1 jul. 2016.
- ATAÍDE, G. M. et al. Óxido nítrico na germinação de sementes de baixo vigor de *Dalbergia nigra*. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38, n. 3, p. 438–444, 24 jan. 2015.
- BAGHERI, M.; GHOLAMI, M.; BANINASAB, B. Hydrogen peroxide-induced salt tolerance in relation to antioxidant systems in pistachio seedlings. **Scientia Horticulturae**, v. 243, p. 207–213, 3 jan. 2019.
- BAILLY, C.; EL-MAAROUF-BOUTEAU, H. Oxidative signaling in seed germination and dormancy. **Plant Signaling & Behavior**, v. 3, p. 175–182, 2008.
- BARBA-ESPÍN, G. et al. Understanding the role of H₂O₂ during pea seed germination: A combined proteomic and hormone profiling approach. **Plant, Cell and Environment**, v. 34,

n. 11, p. 1907–1919, nov. 2011.

BATISTA, R. A. B. et al. Lactose in processed foods: Evaluating the availability of information regarding its amount. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 23, n. 12, p. 4119–4128, 1 dez. 2018.

BAZZAZ, M. M. et al. Canopy Temperature and Yield Based Selection of Wheat Genotypes for Water Deficit Environment. **Open Access Library Journal**, v. 2, n. 10, p. 1–11, 30 out. 2015.

BECKLES, D. M.; THITISAKSAKUL, M. How environmental stress affects starch composition and functionality in cereal endosperm. **Starch/Staerke**, v. 66, n. 1–2, p. 58–71, jan. 2014.

BHANUPRAKASH, K.; YOGEESSHA, H. S. Preparação de sementes para tolerância ao estresse abiótico: uma visão geral. **Abiotic Stress Physiology of Horticultural Crops.**, 2016.

BHATIA, D. et al. Introgression of Yield Component Traits in Rice (*Oryza sativa* ssp. indica) through Interspecific Hybridization. **Crop Science**, v. 57, n. 3, p. 1557–1573, 1 maio 2017.

BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-Aeration following Hypoxia or Anoxia Leads to Activation of the Antioxidative Defense System in Roots of Wheat Seedlings. **Plant Physiology**, v. 116, n. 2, p. 651, 1998.

BONOME, L. T. DA S. et al. Osmoconditioning of urochloa brizantha seeds to reduce pelleting negative effects. **BRAZILIAN JOURNAL OF AGRICULTURE - Revista de Agricultura**, v. 92, n. 2, p. 87, 8 ago. 2017.

BOSETTI, F. **Diversidade genética em germoplasma de arroz japônês utilizando marcadores moleculares e agromorfológicos.** [s.l.] Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2012.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para Análise de Sementes.** 2009.

BUEGE, J. A.; AUST, S. D. Microsomal Lipid Peroxidation. **Methods in Enzymology**, v. 52, n. C, p. 302–310, 1 jan. 1978.

CAI, Y. et al. Effects of water stress during grain-filling period on rice grain yield and its quality under different nitrogen levels. **The Journal of Applied Ecology**, v. 17, n. 7, p. 1201–1206, 2006.

CAO, Y. Y. et al. Growth characteristics and endosperm structure of superior and inferior spikelets of indica rice under high-temperature stress. **Biologia Plantarum**, v. 60, n. 3, p. 532–542, 1 set. 2016.

CARDOSO, E. D. et al. Qualidade fisiológica e composição química de sementes de brachiaria brizantha em função do condicionamento osmótico. **REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL**, v. 2, n. 2, p. 42–48, 7 jul. 2015.

CARVALHO, N.M.; NAKAGAWA, J. Sementes: ciência tecnologia e produção. In: FUNEP (Ed.). . Jaboticabal: [s.n.]. p. 588.

CAVALCANTI, L. S. . et al. **Indução de resistência em plantas a patógenos e insetos.** Piracicaba: [s.n.].

- CHILDS, N. et al. Rice Outlook : December 2021 In this report : **USDA**, p. 1–15, 2021.
- CHUNG, W. H. Unraveling new functions of superoxide dismutase using yeast model system: Beyond its conventional role in superoxide radical scavenging. **Journal of Microbiology**, v. 55, n. 6, p. 409–416, 1 jun. 2017.
- COHEN, I. et al. Meta-analysis of drought and heat stress combination impact on crop yield and yield components. **Physiologia Plantarum**, v. 171, n. 1, p. 66–76, 1 jan. 2021.
- CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira. **Boletim da Safra 2021**, v. 8, n. Terceiro levantamento, p. 59, 2021.
- COOKE, J.; LEISHMAN, M. R. Consistent alleviation of abiotic stress with silicon addition: a meta-analysis. **Functional Ecology**, v. 30, n. 8, p. 1340–1357, 1 ago. 2016.
- CRUSCIOL, C. A. C. et al. Produção e qualidade fisiológica de sementes de arroz de terras altas em função da disponibilidade hídrica. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 23, n. 2, p. 287–293, 30 dez. 2001.
- DAS, K. .; ROYCHOUDHURY, A. Espécies reativas de oxigênio (ROS) e resposta de antioxidantes como scavengers ROS durante o estresse ambiental em plantas. **Fronteiras na Ciência Ambiental**, v. 2, p. 53, 2014.
- DASZKOWSKA-GOLEC, A. Arabidopsis seed germination under abiotic stress as a concert of action of phytohormones. **Omics : a journal of integrative biology**, v. 15, n. 11, p. 763–774, 1 nov. 2011.
- DAVIES, P. J. The plant hormones: Their nature, occurrence, and functions. **Plant hormones**, p. 1–15, 2010.
- DAWOOD, M. F. A. Melatonin: an elicitor of plant tolerance under prevailing environmental stresses. In: **Emerging Plant Growth Regulators in Agriculture**. [s.l.] Academic Press, 2022. p. 245–286.
- DHINGRA, O. D. Importância e perspectivas do tratamento de sementes no Brasil. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 7, n. 1, p. 133–138, 1985.
- DU, S. T. et al. Atmospheric application of trace amounts of nitric oxide enhances tolerance to salt stress and improves nutritional quality in spinach (*Spinacia oleracea* L.). **Food Chemistry**, v. 173, p. 905–911, 15 abr. 2015.
- FAN, G. et al. Chitosan activates defense responses and triterpenoid production in cell suspension cultures of *Betula platyphylla* Suk | . **African Journal of Biotechnology**, v. 9, n. 19, p. 2816–2820, 2010.
- FAN, H. et al. Exogenous nitric oxide improves chilling tolerance of Chinese cabbage seedlings by affecting antioxidant enzymes in leaves. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 55, n. 3, p. 159–165, 2014.
- FARIAS, J. R. B. . et al. **Restrições de disponibilidade hídrica à obtenção de elevados rendimentos de grãos de soja**. Congresso Brasileiro de Sementes. **Anais...**2006
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Oxygen processing in photosynthesis: Regulation and signalling. **New Phytologist**, v. 146, n. 3, p. 359–388, jun. 2000.
- FRITSCHÉ-NETO, R.; DOVALE, J. C.; CAVATTE, P. C. Melhoria para tolerância a

estresses ou para eficiência no uso de recursos? In: **Melhoramento de plantas para condições de estresses abióticos**. Visconde do Rio Branco: [s.n.]. p. 39–79.

FUKAI, S.; COOPER, M. Development of drought-resistant cultivars using physiomorphological traits in rice. **Field Crops Research**, v. 40, n. 2, p. 67–86, 1995.

GADJEV, I.; STONE, J. M.; GECHEV, T. S. Programmed cell death in plants: new insights into redox regulation and the role of hydrogen peroxide. **International review of cell and molecular biology**, v. 270, n. C, p. 87–144, 2008.

GAO, X. et al. Tsc tumour suppressor proteins antagonize amino-acid-TOR signalling. **Nature Cell Biology**, v. 4, n. 9, p. 699–704, 2002.

GARCÍA-CAPARRÓS, P. et al. Oxidative Stress and Antioxidant Metabolism under Adverse Environmental Conditions: a Review. **The Botanical Review**, v. 87, n. 4, p. 421–466, 1 dez. 2020.

GE, X. M. . et al. A proteína G heterotrimérica medeia o fechamento estomático induzido por etileno via síntese de peróxido de hidrogênio em Arabidopsis. **Plant**, v. 82, p. 138–150, 2015.

GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants. **Plant physiology**, v. 59, n. 2, p. 309–14, fev. 1977.

GUIMARÃES, M.A.; GUIMARÃES, A.; SANTANA, T.A.; SILVA, E.V.; ZENZEN, I.; LOUREIRO, M. E. Toxicidade e tolerância ao cádmio em plantas. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 1, n. 3, p. 58, 2008.

GUO, T. R.; ZHANG, G. P.; ZHANG, Y. H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 57, n. 2, p. 182–188, 15 jun. 2007.

HANCOCK, J. T. Oxidative Stress and Redox Signalling in Plants. **eLS**, p. 1–7, 2 mar. 2016.

HASANUZZAMAN, M. et al. Hydrogen peroxide pretreatment mitigates cadmium-induced oxidative stress in Brassica napus L.: An intrinsic study on antioxidant defense and glyoxalase systems. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 10 fev. 2017.

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant physiology**, v. 84, n. 2, p. 450–455, 1 jun. 1987.

HERNÁNDEZ-BARRERA, A. et al. Hyper, a hydrogen peroxide sensor, indicates the sensitivity of the Arabidopsis root elongation zone to aluminum treatment. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 1, p. 855–867, 6 jan. 2015.

HEYDECKER, W.; COOLBEAR, P. Seed treatments for improved performance-survey and attempted prognosis. **Seed Science and Technology**, v. 5, p. 353–425, 1977.

HIDANGMAYUM, A. et al. Application of chitosan on plant responses with special reference to abiotic stress. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 25, n. 2, p. 313–326, 5 mar. 2019.

HU, H.; XIONG, L. Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. **Annual Review of Plant Biology**, v. 65, p. 715–741, 2014.

IBGE. Indicadores IBGE. **Estatística da produção agrícola 2021.**, p. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/ag>, 2021.

- ISHIBASHI, Y. et al. Hydrogen peroxide spraying alleviates drought stress in soybean plants. **Journal of plant physiology**, v. 168, n. 13, p. 1562–1567, 1 set. 2011.
- ISHIBASHI, Y. et al. The interrelationship between abscisic acid and reactive oxygen species plays a key role in barley seed dormancy and germination. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 21 mar. 2017.
- JUNG, K. H.; AN, G.; RONALD, P. C. Towards a better bowl of rice: Assigning function to tens of thousands of rice genes. **Nature Reviews Genetics**, v. 9, n. 2, p. 91–101, fev. 2008.
- KAISER, I. S. et al. Efeito de liberadores de óxido nítrico na qualidade fisiológica de sementes de repolho sob salinidade. **Revista Ceres**, v. 63, n. 1, p. 39–45, 2016.
- KERCHEV, P. I.; BREUSEGEM, F. VAN. Improving oxidative stress resilience in plants. **Plant Journal**, v. 109, n. 2, p. 359–372, 1 jan. 2022.
- KHOUBNASABJAFARI, M.; ANSARIN, K.; JOUYBAN, A. Reliability of malondialdehyde as a biomarker of oxidative stress in psychological disorders. **BioImpacts**, v. 5, n. 3, p. 123–127, 2015.
- LANNA, A.C; CARVALHO, M.A.F.; HEINEMANN, A.B.; STEIN, V. C. **Panorama Ambiental e Físio-Molecular do Arroz de Terras Altas**. Santo Antônio de Goiás: [s.n.]. Disponível em: <www.cnpaf.embrapa.br>.
- LAWLOR, D. W.; CORNIC, G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants. **Plant, cell & environment**, v. 25, n. 2, p. 275–294, 2002.
- LEI, C. et al. Foliar application of chitosan activates artemisinin biosynthesis in *Artemisia annua* L. **Industrial Crops and Products**, v. 33, n. 1, p. 176–182, jan. 2011.
- LI, C. R. et al. Unravelling mitochondrial retrograde regulation in the abiotic stress induction of rice ALTERNATIVE OXIDASE 1 genes. **Plant, Cell and Environment**, v. 36, n. 4, p. 775–788, abr. 2013.
- LI, X.; ZHANG, L. SA and PEG-induced priming for water stress tolerance in rice seedling. **Advances in Intelligent and Soft Computing**, v. 134 AISC, p. 881–887, 2012.
- LIMA, K. S. et al. Chitosan and Laponite: a meta-analysis on their applications. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e132101320903–e132101320903, 9 out. 2021.
- LIMÓN-PACHECO, J.; GONSEBATT, M. E. **The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress** *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* *Mutat Res*, , mar. 2009.
- LIU, X. et al. Physiological and visible injury responses in different growth stages of winter wheat to ozone stress and the protection of spermidine. **Atmospheric Pollution Research**, v. 6, n. 4, p. 596–604, 9 jul. 2015.
- LIZÁRRAGA-PAULÍN, E. G. et al. Chitosan application in maize (*Zea mays*) to counteract the effects of abiotic stress at seedling level. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 34, p. 6439–6446, 26 set. 2013.
- MARCOS-FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 6. ed. Londrina: [s.n.].

- MARINI, P. et al. Alterações fisiológicas e bioquímicas em sementes de arroz submetidas ao estresse térmico. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 43, n. 4, p. 722–730, 2012.
- MARUTA, T. et al. Diversity and evolution of ascorbate peroxidase functions in chloroplasts: More than just a classical antioxidant enzyme? **Plant and Cell Physiology**, v. 57, n. 7, p. 1377–1386, 2016.
- MATHEUS, M. T.; LOPES, C. J. TEMPERATURAS CARDINAIS PARA A GERMINAÇÃO DE SEMENTES DE *Erythrina variegata* L. 1. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, p. 115–122, 2009.
- MERTZ, L. M. et al. Physiological changes in rice seeds exposed to cold in the germination phase. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 2, p. 262–270, 2009.
- MILADINOV, Z. et al. Optimal time of soybean seed priming and primer effect under salt stress conditions. **Journal of Agricultural Sciences, Belgrade**, v. 60, n. 2, p. 109–117, 2015.
- MITCHELL, J. et al. Gibberellin response in the embryo epidermis regulates germination uniformity in response to seed priming. **bioRxiv**, p. 436121, 5 out. 2018.
- MITTLER, R. ROS Are Good. **Trends in Plant Science**, v. 22, n. 1, p. 11–19, 1 jan. 2017.
- MONDAL, M. M. A. et al. Foliar application of chitosan improves growth and yield in maize. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, p. 520–523, 2013.
- MORAIS, O. P. DE et al. Cultivares de Arroz de Terras Altas para o Mato Grosso. **Circular Técnica 68**, p. 1–8, 2004.
- MORISON, J. I. L. et al. Improving water use in crop production. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1491, p. 639–658, 12 fev. 2007.
- MULLINEAUX, P. M.; RAUSCH, T. Glutathione, photosynthesis and the redox regulation of stress-responsive gene expression. **Photosynthesis Research**, v. 86, n. 3, p. 459–474, dez. 2007.
- MURCH, S. J. ; ERLAND, L. A. E. A Systematic Review of Melatonin in Plants: An Example of Evolution of Literature. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1–24, 2021.
- NAEEM, A. et al. Silicon nutrition lowers cadmium content of wheat cultivars by regulating transpiration rate and activity of antioxidant enzymes. **Environmental Pollution**, v. 242, p. 126–135, 1 nov. 2018.
- NAFEES, M. . et al. Sinalização de espécies reativas de oxigênio em plantas. In: **Plant Abiotic Stress Tolerance**. [s.l: s.n.]. p. 259–272.
- NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867–880, ago. 1981.
- NAKAO, E. A.; CARDOSO, V. Priming and temperature limits for germination of dispersal units of *Urochloa brizantha* (Stapf) Webster cv. basilisk. **Braz. J. Biol**, v. 75, n. 1, p. 234–241, 2015.
- NAWAZ, F. et al. Selenium (Se) Seed Priming Induced Growth and Biochemical Changes in Wheat Under Water Deficit Conditions. **Biological trace element research**, v. 151, n. 2, p.

284–293, 2013.

NGUYEN, H. T.; BABU, R. C.; BLUM, A. Breeding for drought resistance in rice: Physiology and molecular genetics considerations. **Crop Science**, v. 37, n. 5, p. 1426–1434, 1997.

OHISHI, N. et al. Involvement of auxin biosynthesis and transport in the antheridium and prothalli formation in *lygodium japonicum*. **Plants**, v. 10, n. 12, 1 dez. 2021.

OLIVEIRA, A. S. **Condicionamento Fisiológico de Sementes de Tabaco**. Lavras: Tese (Doutorado em Fitotecnia)- Universidade Federal de Lavras, 2016.

OLIVEIRA, F. H. S. ; MONDO, V. H. V. **Condicionamento fisiológico de semente de arroz (*Oryza sativa* L.): Efeitos sobre o ciclo e produção da cultura**. (Embrapa Arroz e Feijão, Ed.)9º Seminário Jovens Talentos: Coletânea dos Resumos. **Anais...**2015

OLIVEIRA, T. F. et al. Protective action of priming agents on *Urochloa brizantha* seeds under water restriction and salinity conditions. **Journal of Seed Science**, v. 43, 31 maio 2021.

ONU. **População mundial deve ter mais 2 bilhões de pessoas nos próximos 30 anos**ONU NEWS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/06/1676601>>. Acesso em: 2 mar. 2022.

OZYIGIT, I. I. et al. Identification and comparative analysis of H₂O₂-scavenging enzymes (ascorbate peroxidase and glutathione peroxidase) in selected plants employing bioinformatics approaches. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. MAR2016, 22 mar. 2016.

PANDA, S. et al. Proofing Direct-Seeded Rice with Better Root Plasticity and Architecture. **International Journal of Molecular Sciences 2021, Vol. 22, Page 6058**, v. 22, n. 11, p. 6058, 4 jun. 2021.

PAPARELLA, S. et al. Seed priming: state of the art and new perspectives. **Plant Cell Reports**, v. 34, n. 8, p. 1281–1293, 24 ago. 2015.

PEREIRA, F. J. **CARACTERÍSTICAS ANATÔMICAS E FISIOLÓGICAS DE AGUAPÉ E ÍNDICE DE FITORREMEDIAÇÃO DE ALFACE D'ÁGUA CULTIVADOS NA PRESENÇA DE ARSÊNIO, CÁDMIO E CHUMBO**. [s.l.] Tese(doutorado)-Universidade Federal de Lavras, 2010.

PEREIRA, S. R. et al. Priming of *Urochloa brizantha* cv. Xaraés seeds. **African Journal of Agriculture Research**, v. 13, n. 1, p. 2804–2807, 2018.

PETROV, V. et al. ROS-mediated abiotic stress-induced programmed cell death in plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, n. FEB, p. 69, 18 fev. 2015.

PIMENTEL, C. **A Relação da Planta com a Água**. [s.l: s.n.].

PINHEIRO, B. D. S.; CASTRO, E. D. M. D.; GUIMARÃES, C. M. Sustainability and profitability of aerobic rice production in Brazil. **Field Crops Research**, v. 97, n. 1 SPEC. ISS., p. 34–42, 5 maio 2006.

PIRES, R. M. DE O. et al. Action of nitric oxide in sesame seeds (*Sesamum indicum* L.) submitted to stress by cadmium. **Journal of Seed Science**, v. 38, n. 1, p. 22–29, 4 abr. 2016.

PRADHAN, N.; PRAKASHP.; TIWARIS, S.K.; CHINNAPPAM.; SHARMA, R.P.; SINGH, P. M. Osmopriming of Tomato Genotypes with Polyethylene Glycol 6000 Induces Tolerance

to Salinity Stress. **Trends in Biosciences**, v. v. 7, p. 4412–4417, 2014.

QUAN, L. J. et al. Hydrogen peroxide in plants: A versatile molecule of the reactive oxygen species network. **Journal of Integrative Plant Biology**, v. 50, n. 1, p. 2–18, jan. 2008.

REED, R. C.; BRADFORD, K. J.; KHANDAY, I. Seed germination and vigor: ensuring crop sustainability in a changing climate. **Heredity**, 2022.

REITER, R. J. et al. Phytomelatonin: Assisting plants to survive and thrive. **Molecules**, v. 20, n. 4, p. 7396–7437, 1 abr. 2015.

RIBEIRO, E. C. G. et al. Physiological quality of *Urochloa brizantha* seeds submitted to priming with calcium salts. **Pesquisa Agropecuaria Tropical**, v. 49, 6 fev. 2019.

ROY, S. J.; TUCKER, E. J.; TESTER, M. Genetic analysis of abiotic stress tolerance in crops. **Current opinion in plant biology**, v. 14, n. 3, p. 232–239, jun. 2011.

RUTTANARUANGBOWORN, A. et al. Effect of seed priming with different concentrations of potassium nitrate on the pattern of seed imbibition and germination of rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 605–613, 1 mar. 2017.

SABERALI, S. F.; MORADI, M. Effect of salinity on germination and seedling growth of *Trigonella foenum-graecum*, *Dracocephalum moldavica*, *Satureja hortensis* and *Anethum graveolens*. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 3, p. 316–323, 1 jul. 2019.

SACHDEV, S. et al. Abiotic stress and reactive oxygen species: Generation, signaling, and defense mechanisms. **Antioxidants**, v. 10, n. 2, p. 1–37, 1 fev. 2021.

SANTOS, R. F.; CARLESSO, R. DÉFICIT HÍDRICO E OS PROCESSOS MORFOLÓGICO E FISIOLÓGICO DAS PLANTAS. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 2, n. 3, p. 287–294, 1998.

SANZ, L. et al. Nitric oxide (NO) and phytohormones crosstalk during early plant development. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 10, p. 2857–2868, 1 maio 2015.

SCHWEMBER, A. R.; BRADFORD, K. J. Quantitative trait loci associated with longevity of lettuce seeds under conventional and controlled deterioration storage conditions. **Journal of Experimental Botany**, v. 61, n. 15, p. 4423–4436, 1 out. 2010.

SEWELAM, N.; KAZAN, K.; SCHENK, P. M. Sinalização global de estresse em plantas: espécies reativas de oxigênio na encruzilhada. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, p. 187, 2016.

SHARMA, P. et al. Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and Antioxidant Status of *Brassica juncea*. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 167, n. 8, p. 2225–2233, ago. 2012.

SILVA, A. L. D. ; et al. Effect of cyanide by sodium nitroprusside (SNP) application on germination, antioxidative system and lipid peroxidation of *Senna macranthera* seeds under saline stress 1. **Journal of Seed Science**, n. 1, p. 86–096, 2019.

SILVA, C. B. et al. Performance of bell pepper seeds in response to drum priming with addition of 24-epibrassinolide. **HortScience**, v. 50, n. 6, p. 873–878, 2015.

SILVA, L. M. E et al. Hydrothermal treatment in the management of anthracnose in ‘Prata-Anã’ banana produced in the semiarid region of Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de**

Fruticultura, v. 40, n. 2, p. 1–8, 2018.

SNEYD, L. Wild Food Consumption and Urban Food Security. **Rapid Urbanisation, Urban Food Deserts and Food Security in Africa**, p. 143–155, 1 jan. 2016.

SOCOLOWSKI, F.; TAKAKI, M. Germination of Jacaranda mimosifolia (D. Don - Bignoniaceae) seeds: effects of light, temperature and water stress. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n. 5, p. 785–792, 1 set. 2004.

SOHAG, A. A. M. et al. Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuate drought stress in rice. **Plant, Soil and Environment**, v. 66, n. 1, p. 7–13, 2020.

SOSBAI. Arroz Irrigado - Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil. **XXIX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**, p. 205, 2018.

SOUZA, N. M. DE. **TOLERÂNCIA A BAIXAS TEMPERATURAS NA FASE DE MICROSPOROGENESE EM GENÓTIPOS DE ARROZ IRRIGADO**. [s.l.] Dissertação (Produção Vegetal)- Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2015.

STEINMETZ, S.; SILVA, S.C.; SANTANA, N. . A cultura do arroz no Brasil. In: FEIJÃO, E. A. E (Ed.). . **Clima**. 2. ed. Santo Antônio de Goiás: [s.n.]. p. 117–160.

STONE, L. F.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Deficiência hídrica, vermiculita e cultivares. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, p. 695–707, 1984.

TABALDI, L. A. et al. Oxidative stress is an early symptom triggered by aluminum in Al-sensitive potato plantlets. **Chemosphere**, v. 76, n. 10, p. 1402–1409, 2009.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. [s.l.: s.n.]. v. 6 ed.

TERRA, T. G. R. et al. Tolerância de linhagens de arroz de terras altas à seca. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 43, n. 2, p. 201–208, abr. 2013.

TEZARA, W. et al. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. **Nature**, v. 401, n. 6756, p. 914–917, 28 out. 1999.

THOMAS, T. et al. Identification of rice genotypes for seedling stage multiple abiotic stress tolerance. **Plant Physiology Reports**, v. 25, n. 4, p. 697–706, 1 dez. 2020.

VELIKOVA, V.; YORDANOV, I.; EDREVA, A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants Protective role of exogenous polyamines. **Plant Science**, v. 151, p. 59–66, 2000.

VERSLUES, P. E. et al. Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. **The Plant Journal**, v. 45, n. 4, p. 523–539, 1 fev. 2006.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L. A. DE. Arroz : composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, p. 1184–1192, 2008.

WANG, W. et al. The effect of storage condition and duration on the deterioration of primed rice seeds. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 13 fev. 2018.

WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive Oxygen Species in Plant Signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 209–236, 29 abr. 2018.

WEISS, D.; ORI, N. Mechanisms of Cross Talk between Gibberellin and Other Hormones 1.

Update on Cross Talk between Gibberellin and Other Hormones Mechanisms, v. 144, p. 1240–1246, 2007.

WEISZ, D. A.; GROSS, M. L.; PAKRASI, H. B. Reactive oxygen species leave a damage trail that reveals water channels in Photosystem II. **Science Advances**, v. 3, n. 11, 2017.

WOJTYLA, Ł. et al. Different modes of hydrogen peroxide action during seed germination. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, n. FEB2016, p. 66, 4 fev. 2016.

WU, W.; DUNCAN, R. W.; MA, B. L. Quantification of canola root morphological traits under heat and drought stresses with electrical measurements. **Plant and Soil**, v. 415, n. 1–2, p. 229–244, 1 jun. 2017.

YAN, M. Prolonged storage reduced the positive effect of hydropriming in Chinese cabbage seeds stored at different temperatures. **South African Journal of Botany**, v. 111, p. 313–315, 1 jul. 2017.

YOSHIDA, S. **Fundamentals of rice crop**. Los Baños, Laguna: [s.n.].

ZHANG, N. et al. Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. **Journal of experimental botany**, v. 66, n. 3, p. 647–656, 1 fev. 2014a.

ZHANG, N. et al. Roles of melatonin in abiotic stress resistance in plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 66, n. 3, p. 647–656, 1 fev. 2014b.

ZHANG, Z. et al. Gene Knockout Study Reveals That Cytosolic Ascorbate Peroxidase 2(OsAPX2) Plays a Critical Role in Growth and Reproduction in Rice under Drought, Salt and Cold Stresses. **PLoS ONE**, v. 8, n. 2, 28 fev. 2013.

ZHENG, M. et al. Seed priming in dry direct-seeded rice: consequences for emergence, seedling growth and associated metabolic events under drought stress. **Plant Growth Regulation**, v. 78, n. 2, p. 167–178, 1 mar. 2016.