



**GIOVANI VIRGÍLIO TIRELLI**

**DEFICIT HÍDRICO NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E  
CRESCIMENTO DE PLÂNTULAS DE ARROZ DE TERRAS  
ALTAS**

**LAVRAS - MG  
2021**

**GIOVANI VIRGÍLIO TIRELLI**

**DEFICIT HÍDRICO NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E CRESCIMENTO DE  
PLÂNTULAS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS**

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

Profa. Dra. Heloisa Oliveira dos Santos  
Orientadora

Profa. Dra. Flávia Barbosa Silva Botelho  
Coorientadora

**LAVRAS-MG  
2021**

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

Tirelli, Giovani Virgílio.

Deficit hídrico na germinação de sementes e crescimento de  
plântulas de arroz de terras altas / Giovani Virgílio Tirelli. - 2021.  
69 p. : il.

Orientador(a): Heloisa Oliveira dos Santos.

Coorientador(a): Flávia Barbosa Silva Botelho.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2021.

Bibliografia.

1. Estresse abiótico. 2. Antioxidante. 3. *Oriza sativa* sp. I.  
Santos, Heloisa Oliveira dos. II. Botelho, Flávia Barbosa Silva. III.  
Título.

**GIOVANI VIRGÍLIO TIRELLI**

**DEFICIT HÍDRICO NA GERMINAÇÃO DE SEMENTES E CRESCIMENTO DE  
PLÂNTULAS DE ARROZ DE TERRAS ALTAS**

**WATER DEFICIT IN SEED GERMINATION AND GROWTH OF  
HIGHLAND RICE SEEDLINGS**

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

APROVADA em 18 de agosto de 2021.

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  
2021**

*A Deus, por guiar meus caminhos e me conceder tantas bênçãos. À minha família, por todo o amor e exemplo passado. Aos meus amigos, pelos momentos incríveis vividos*

*Dedico*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por permitir e iluminar toda a minha trajetória.

A meus pais, Silvana e Luiz Ricardo, por todo o apoio, dedicação e esforços para que eu pudesse me tornar quem eu sou.

À minha irmã Aline, pelo companheirismo e eterna parceria, e também por me agradecer com o maior amor que eu poderia ter esse ano, a minha linda Maria .

À minha orientadora, Dra. Heloisa Oliveira dos Santos, pelas oportunidades, competência, paciência e disposição nas horas de desespero.

A todo o apoio e ajuda das minhas eternas amigas Ana Reale e Giovana, por sempre estarem presentes com a maior disposição possível, vocês são incríveis!

À professora Dra. Flávia Barbosa Barbosa Silva Botelho, por aceitar me coorientar.

Ao Programa de Melhoramento de Arroz de Terras altas, do convênio entre a UFLA, EPAMIG e Embrapa por me conceder os materiais de estudo e suporte.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Agricultura, em especial ao Setor de Sementes, pela oportunidade de realização do curso e condução do 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 funcionários e técnicos do Laboratório de Análises de Sementes (LAS), por toda a dedicação e auxílio.

Aos meus grandes amigos, moradores e ex moradores da República Araguaia, que se tornaram minha segunda família, que com cumplicidade, respeito, união, força e confiança, fizeram essa jornada inesquecível.

Aos membros do Núcleo de Estudo em Sementes, pelo aprendizado e crescimento pessoal e profissional durante 2 anos de convívio.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para que essa fase fosse tão abençoada e especial.

Muito obrigado!

*“Comida é um direito moral para todos que nascem neste mundo.”*

*(Norman Borlaug – Nobel da Paz 1970)*

## RESUMO

O arroz é uma cultura de grande impacto mundial, é o segundo cereal mais consumido e está presente diariamente na mesa de mais de dois terços da toda a população. É uma cultura que possui grande importância no combate à fome e desnutrição, pois é um alimento rico em carboidratos, vitaminas e proteínas. O Brasil está entre os dez maiores produtores, contudo, a variedade de terras altas se encontra muito aquém do potencial ao qual possui, participando apenas de um quarto de toda a produção nacional. Mesmo com essa baixa participação em toda a produção, o arroz de sequeiro tem grande importância para a agricultura brasileira, é utilizado para abertura e revitalização de áreas e também tem grande influência no controle de preços no país. Assim, para mais segurança na utilização dessa atividade nas regiões produtoras de grãos no país, como o cerrado, o entendimento dos efeitos ambientais torna-se necessário, principalmente se tratando da seca, pois, a orizicultura é uma das culturas mais sensíveis à falta de água, e dependendo da época de estiagem, as perdas podem chegar a 70% da produção. A qualidade fisiológica de sementes é um importante parâmetro para avaliar a capacidade de um material em formar uma planta, assim, a sua utilização para seleção de genótipos mais vigorosos torna-se necessária, principalmente quando se quer avaliar o efeito de estresses ambientais sobre diferentes genótipos. A seca é uma condição extrema e que propociona à planta de arroz, muitas mudanças, as enzimas do complexo antioxidante, por exemplo, são substâncias importantes para o equilíbrio celular, pois controlam as espécies reativas de oxigênio, que são radicais livres produzidos naturalmente na planta, e evitam seu acúmulo e possíveis danos. Sabendo que a falta de água promove alterações no metabolismo das plantas, e que por meio da influência direta na concentração de CO<sub>2</sub> e na superexcitação do fotossistema II, há um aumento da produção das espécies reativas de oxigênio, o objetivo deste trabalho foi caracterizar diferentes linhagens de arroz de terras altas quanto à qualidade fisiológica e desenvolvimento das plântulas para tolerância à incidência de seca, e avaliar a atividade e expressão das enzimas do complexo antioxidante quanto a resposta à indução de estresse hídrico na fase reprodutiva em genótipos de arroz de terras altas.

Palavras-chave: *Oriza sativa* sp. Antioxidante. Tolerância. Estresse abiótico. Enzimas. Qualidade fisiológica.



## ABSTRACT

Rice is a crop of great global impact, it is the second most consumed cereal and is present daily on the table of more than 2/3 of the entire population. It is a culture that has great importance in the issue of fighting hunger and malnutrition, as it is a food rich in carbohydrates, vitamins and proteins. Brazil is among the ten largest producers, however, the highland variety is far from the potential it has, participating only in 1/4 of all national production. Even with this low share in all production, upland rice is of great importance for Brazilian agriculture, it is used to open up and revitalize areas and also has a great influence on price controls in the country. Thus, for more safety in the use of this activity in the country's grain-producing regions, such as the cerrado, the understanding of the environmental effects becomes necessary, especially in the case of drought, since rice farming is one of the most sensitive crops to the lack of water and depending on the dry season, losses can reach 70% of production. The physiological quality of seeds is an important parameter to assess the capacity of a material to form a plant, so its use for selection of more vigorous materials becomes necessary especially when one wants to assess the effect of environmental stresses on different genotypes. Drought is an extreme condition that provides the rice plant with many changes, the antioxidant complex enzymes, for example, are important substances for cell balance, they control the reactive oxygen species, which are free radicals produced naturally in the plant, and prevent their accumulation and possible damage. Knowing that the lack of water promotes changes in plant metabolism, and that through the direct influence on the concentration of CO<sub>2</sub> and the overexcitation of photosystem II, there is an increase in the production of reactive oxygen species, the objective of this work was to characterize different upland rice strains regarding the physiological quality and development of seedlings for tolerance to drought incidence and to assess the activity and expression of antioxidant complex enzymes in relation to the response to induction of water stress in the reproductive phase in upland rice genotypes tall.

Key-words: *Oriza sativa* sp. Antioxidant. Tolerance. Abiotic stress. Enzymes. Physiological quality.

## SUMÁRIO

	<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Cultura do arroz: importância no Brasil.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Impactos do deficit hídrico na cultura do arroz .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3</b>	<b>Deficit hídrico no desenvolvimento e qualidade de sementes .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>Espécies reativas de oxigênio (EROs) .....</b>	<b>18</b>
<b>2.5</b>	<b>Mecanismos de defesa.....</b>	<b>20</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>22</b>
	<b>CAPÍTULO 2 QUALIDADE DE SEMENTES DE ARROZ PRODUZIDAS EM CONDIÇÕES DE DEFICIT HÍDRICO .....</b>	<b>27</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>31</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>42</b>
	<b>CAPÍTULO 3 DESEMPENHO FISIOLÓGICO E BIOQUÍMICO DE SEMENTES E PLÂNTULAS DE ARROZ PRODUZIDAS EM CONDIÇÕES DE DEFICIT HÍDRICO.....</b>	<b>44</b>
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>46</b>
<b>2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>

## CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

### 1 INTRODUÇÃO

Considerado um dos principais alimentos no mundo, o arroz (*Oryza sativa* L.) vem como uma importante fonte de combate à fome e a desnutrição no mundo, principalmente em países de menor renda, devido a sua excelente fonte de energia, vitaminas e proteínas necessárias ao homem e, sobretudo, constitui a dieta de mais de 50% da população mundial (SNEYD, 2016).

O Brasil é um importante centro rizicultor, segundo a FAO (2019) o país detém a nona posição da produção mundial e é o único país não asiático entre os dez maiores. Na safra 2020/21 a produção ficou em torno de 11,7 milhões de toneladas ocupando uma área de aproximadamente 1,7 milhões de hectares (CONAB, 2021).

Devido a sua boa adaptação a solos mais ácidos, o arroz foi bastante usado em aberturas de áreas, principalmente na região do cerrado brasileiro, onde mesmo com uma precipitação média anual em torno de 1200-1500 mm, a cultura sofre com os períodos de estiagens característicos do local, acarretando perdas de produtividade e instabilidade na produção (LANNA *et al.*, 2012). Isto ocorre porque tais períodos incidem quando a planta se encontra nos mais sensíveis estádios de seu desenvolvimento, que são nos períodos de florescimento e enchimento de grãos os quais os danos oriundos da restrição hídrica são irreversíveis, tornando a cultura de alto risco.

Dessa forma, a seleção de genótipos tolerantes ao déficit hídrico deve ser uma linha de pesquisa prioritária para esta cultura (WANG *et al.*, 2011). As sementes sendo a principal fonte de transferência de qualidade e tecnologia 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). O efeito ambiental tem grande influência quanto a qualidade das sementes, sendo a principal causa de decréscimo quando o mesmo não se encontra em equilíbrio (FARIAS, 2006; NOGUEIRA, 2001).

A maior produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) é a principal resposta quando uma planta ou semente passa por efeitos ambientais adversos. Essas substâncias em maior quantidade causam um desequilíbrio ocasionando o efeito chamado estresse oxidativo e que acarreta na perda de qualidade principalmente em sementes (MACHADO *et al.*, 2009).

Por mais que sejam produtos naturais de organismos aeróbicos (OZTETIK, 2011),

mecanismos de combate ao excesso de EROs são formas de obter uma maior tolerância a intempéries ambientais, sobretudo nos dias de hoje, quando mudanças do equilíbrio de chuvas estão mais frequentes. Superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidases (APX) destacam-se quanto a esses mecanismos de combate a toxicidade das espécies reativas de oxigênio em plantas.

Plantas e sementes com maior expressão de enzimas do complexo antioxidante tendem a possuir melhor adaptação quando submetidas à ambientes adversos, pois as mesmas possuem a capacidade de neutralização do efeito citotóxico das EROs nas células (SERKEDJIEVA, 2011).

Assim, para todo o processo de produção, essa correlação entre a produção de EROs e atividade do complexo antioxidante é de fundamental importância na busca de melhores genótipos para o campo. As plantas com maior expressão de enzimas e proteínas antioxidantes apresentam maior tolerância a estresses ambientais como o déficit hídrico (NING *et al.*, 2010; ZHU, 2002).

Diante do exposto, estudos com objetivo de avaliar a qualidade fisiológica e expressão de enzimas envolvidas no processo de tolerância ao déficit hídrico em semente, sobretudo em linhagens de arroz de terras altas, chegam como uma importante ferramenta para contribuir na seleção de genótipos para programas de melhoramento convencional, visando aumentar a estabilidade da cultura imposta a estes ambientes.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cultura do arroz: importância no Brasil

O arroz é uma planta da família das gramíneas, do gênero *Oriza*, possui cerca de vinte espécies sendo a mais cultivada a *Oriza sativa* L. É caracterizada como uma cultura anual, de ciclo C3 com grande adaptação a ambientes aquáticos e quentes. Tem como centro de origem o sudeste asiático, onde se encontram os maiores produtores e consumidores do mundo, contudo, o Brasil tem destaque nesse cenário sendo o único país fora da Ásia entre os dez maiores produtores. Segundo a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura FAO (2019), o país possui a nona maior produção de arroz do mundo.

Em países em desenvolvimento como o Brasil, a cultura orizícola detém um papel fundamental na questão da segurança alimentar e combate à fome. É um cereal de baixo custo e atende em boa parte as necessidades nutricionais diárias de um ser humano adulto, é capaz de fornecer 20% da energia e 15% da proteína necessária (EMBRAPA, 2005; SOSBAI, 2016).

Com uma produção estimada de 11,1 ton para safra 2020/21 (CONAB, 2021), a perspectiva é de uma recuperação do estoque nacional, retração do consumo interno devido ao atual cenário de recuperação econômico do país e projeção da manutenção do alto valor do produto, que no ano de 2020 alcançou patamares históricos em decorrência dos efeitos causados pela pandemia do coronavírus.

No Brasil, o cultivo de arroz é caracterizado por dois sistemas de plantio, um que a cultura recebe água de forma controlada e sistematizada através de inundação ou asperção, que é o chamado arroz irrigado ou de várzea, e um sistema ao qual a planta tem sua demanda suprida apenas pela água da chuva, 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 70,3% da produção nacional, os maiores produtores (IBGE, 2021).

Já o arroz de sequeiro tem uma essencial participação na dinâmica da agricultura brasileira, foi a principal prática da expansão agrícola no cerrado devido a sua característica de boa adaptação a solos ácidos (GUIMARÃES *et al.*, 2006; MENDEZ DEL VILLAR; FERREIRA, 2005). Os estados de Tocantins e Mato Grosso são os principais produtores dessa variedade, nestes estados, o seu uso está associado à abertura e recuperação de áreas, precedendo o cultivo de outras culturas (IBGE, 2021). Por possuir menor produtividade e

contar com a instabilidade das chuvas, o arroz de terras altas vem sofrendo gradativa redução

de suas áreas plantadas, o que torna investimentos na obtenção de cultivares tolerante à seca necessários, pois o arroz de sequeiro tem um importante papel no abastecimento interno, atuando como regulador de preços (RICARDO, 2010; WANDER, 2015).

Com o crescente aumento da população, o estímulo ao aumento da produção de alimentos vem ganhando cada vez mais força, contudo, em decorrência das mudanças climáticas observadas e questões da sustentabilidade cada vez mais relevantes, este aumento deve ser feito respeitando as áreas já utilizadas, o que torna estudos quanto às técnicas de manejo, preparo e fertilidade do solo e variedades resistentes mais essenciais.

Com isso, o Brasil pode se tornar uma alternativa viável ao aumento da produção orizícola, visto o enorme potencial de área que a variedade de terras altas possui no país, podendo ser utilizado na técnica de rotação de culturas nas grandes regiões produtoras de grãos.

## **2.2 Impactos do deficit hídrico na cultura do arroz**

O deficit hídrico é um dos fatores com maior restrição e influência na produção e estabilidade da produtividade de diversas culturas no mundo. Segundo Taiz e Zeiger (2013) a diminuição da disponibilidade de água no solo leva ao decréscimo da produção de área foliar, acelerando a senescência e a abscisão das folhas através do fechamento estomático. Estas repostas ao deficit hídrico acarretam um desequilíbrio entre a produção de fotoassimilados e a demanda para o desenvolvimento da planta, o que afeta a produtividade da cultura (GERIK *et al.*, 1996).

A orizicultura é uma das práticas agrícolas que mais consomem água doce no mundo (BAHUGUNA *et al.*, 2018), estima-se que devido a seca, a cultura perca por ano, cerca de 18 milhões de toneladas de produção em todo o planeta (DHAKAREY *et al.*, 2017). Redução de 20% a 70% na produtividade são observadas em plantações de arroz sob deficit hídrico (LILLEY; FUKAI, 1994).

A cultura, especificamente o de terras altas, está sujeita a inúmeras variáveis ambientais, pois mesmo sendo cultivada em regiões com índices pluviométricos elevados, o seu desempenho está diretamente ligado a ocorrência e duração das chuvas, principalmente nos períodos considerados críticos (TUONG *et al.*, 2000). O arroz apresenta uma resposta diferente ao deficit hídrico de acordo com a fase de desenvolvimento fenológico apresentado pela cultura (BELDER *et al.*, 2004).

A baixa disponibilidade hídrica durante o início do processo germinativo pode causar

a perda da germinação e alterar a velocidade e a uniformidade de emergência no campo, o que compromete a produção e o estabelecimento do stand. Isto ocorre, pois a água é a responsável pela manutenção da organização do sistema de membrana e retomada dos processos metabólicos de desenvolvimento inicial (MARCOS FILHO, 2015).

Na fase vegetativa, por exemplo, o estresse ocasionado pela falta de água afeta o perfilhamento, o que acarreta a diminuição no número de panículas (WOPEREIS, 1996). Já na fase reprodutiva, os períodos de floração (R4) e enchimento de grãos (R5- R7) são os de maior sensibilidade da planta, seus danos podem ser irreversíveis e acarretar grandes perdas no rendimento da lavoura (WANG *et al.*, 2010; BAHUGUNA *et al.*, 2018). Nesta fase, a falta de água afeta as células meristemáticas e os processos de divisão celular de formação dos pólenes, causando a esterilidade das espiguetas e queda do número de grãos cheios, além de aumentar o número de grãos gessados (CAI *et al.*, 2006; JIN *et al.*, 2013; O'TOOLE, 1982).

A umidade é um fator crucial para o desenvolvimento, enchimento e atividade metabólica das sementes, ela está relacionada com a síntese e acúmulo de reservas nas células (OCHATT, 2015). Em resposta à variável ambiental há um aumento na viscosidade da sacarose, o que dificulta seu fluxo nas células condutoras do floema prejudicando o seu acúmulo nas sementes (SEVANTO, 2014).

Por limitar absorção de CO<sub>2</sub> devido ao fechamento estomático e diminuir a fotossíntese líquida, o déficit hídrico causa um desequilíbrio na produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), o aumento dessas substâncias causa um efeito fitotóxico às células da planta (MILLER *et al.*, 2010; YANG *et al.*, 2017). Este efeito chamado de estresse oxidativo faz com que a célula passe por distúrbios metabólicos, como a peroxidação lipídica, e que exercem grande influência no rendimento e na qualidade das sementes (CHAVES; OLIVEIRA, 2004; AILI *et al.*, 2004).

Por apresentar alteração no metabolismo de amidos, o período de enchimento dos grãos e acúmulo de matéria seca é reduzido, o que faz a seca ter impacto direto sobre a principal preocupação dos agricultores, a produtividade, pois ela diminui o número de grãos por espiga, o número de espigas por planta e o peso individual dos grãos, ocasiando grandes perdas na produção (SAMARAH *et al.*, 2009).

Plantas tolerantes a esse tipo de estresse, assim que estimuladas através dasinalização das EROs, aumentam a atividade das enzimas antioxidantes que atuam na eliminação dos radicais livres gerados pelos danos oxidativos das EROs (CHAI *et al.*, 2016).

Mediante essas características da cultura, estudos visando o detalhamento fisiológico e molecular da cultura do arroz, tornam-se ferramentas essenciais para auxiliar programas de



melhoramento convencional na busca por genótipos mais tolerantes.

### **2.3 Deficit hídrico no desenvolvimento e qualidade de sementes**

A incidência de estresses abióticos como o deficit hídrico está cada vez mais frequente e diretamente correlacionada à queda de produtividade e qualidade dos campos de produção, afetando o peso e a composição final das sementes (PRASAD *et al.*, 2017; ZANDALINAS *et al.*, 2018).

Com o aumento populacional e alta na demanda por alimentos, sistemas modernos e que visam maior rendimento são cada vez mais necessários, pois segurança e qualidade durante todo o processo de produção são fundamentais para se obter sucesso. A semente é o principal meio de transferência de tecnologia genética para o campo, assim, muitos cuidados devem estar presentes na produção das mesmas, pois tanto no processo de condução da lavoura quanto no de pós-colheita, as sementes podem sofrer injúrias que resultam em perdas na sua qualidade.

No desenvolvimento e formação das sementes, a restrição hídrica é o principal limitador, ela reduz o número e a viabilidade dos grãos de pólen e reprime o desenvolvimento das anteras prejudicando a polinização (NISHIYAMA, 1984; AL-GHZAWI *et al.*, 2009). Em arroz, a seca causa diversos efeitos ao desenvolvimento gametofítico masculino, sendo este, um período considerado crítico, pois é o início do estágio reprodutivo e a formação dos grãos de pólen necessita de energia e água suficiente (SHEORAN; SAINI, 1996). O desenvolvimento de estruturas femininas também é muito vulnerável ao deficit hídrico, a redução do suprimento de fotoassimilados pode ocasionar o abortamento e a má formação dos ovários (BOYER; WESTGATE, 2004). Assim, a má distribuição e incidência de água no período reprodutivo afeta diretamente o rendimento e qualidade das sementes.

Mudanças hormonais também ocorrem em plantas de arroz sob efeito de deficit hídrico. O ácido abscísico (ABA), a auxina e a citosinina possuem papel fundamental na mobilização de fotoassimilados e nutrientes ao desenvolvimento de sementes em cereais (YU *et al.*, 2015). Em arroz, o ABA afeta diretamente a duração do período de enchimento dos grãos, pois, ao aumentar a senescência das folhas o fitohormônio acarreta uma queda na atividade fotossintética promovendo um encurtamento de todo o processo de acúmulo de matéria seca (YANG; ZHANG, 2006; YU *et al.*, 2015).

Em termos de qualidade, uma semente é assim determinada através da interação de quatro parâmetros indispensáveis, sendo: a qualidade genética, relacionada às características intrínsecas da cultivar; a qualidade física, responsável pela pureza e estado físico do lote; a

qualidade fisiológica, que corresponde à capacidade daquela semente em gerar plântulas normais e; a qualidade sanitária, que é a ausência de pragas e doenças (MARCOS FILHO, 2015).

Vigor e viabilidade também são fatores a serem analisados na caracterização de uma boa semente, pois são necessários para um ótimo estabelecimento no campo, com a máxima germinação possível (POPINIGIS, 1977; VIEIRA; CARVALHO, 1994).

A restrição hídrica compromete a qualidade das sementes cerealíferas na sua formação, pois associada a altas temperaturas compromete a deposição de amido nas células do endosperma, diminuindo a sua concentração, o que causa uma redução no acúmulo de matéria seca e vigor das sementes (PESKE, 2012; TAIZ; ZEIGER, 2013).

Sabe-se que sementes produzidas em condições de déficit hídrico na fase de enchimento dos grãos apresentam menor porcentagem de germinação e menor peso seco das plântulas (SMICIKLAS *et al.*, 1992), contudo, alguns estudos mostram que a viabilidade das sementes não é muito afetada, porém, se submetidas a alguma condição ambiental adversa há perda de vigor, como visto por Samarah e Alqudah (2009) no teste de envelhecimento acelerado em sementes de cevada.

Características como a presença de epiderme protetora, tolerância à dessecação e maior atividade das enzimas do complexo antioxidante, são mecanismos que dão às sementes, meios de proteção e reparação quando submetidas a condições adversas (KRANNER *et al.*, 2010).

Pouco se sabe quanto à tolerância ao déficit hídrico na cultura de arroz, principalmente o de cultivo em sequeiro. Com isso, alternativas de contornar essas adversidades são importantes para uma semente de qualidade, estudos mostram que a presença e atividade de enzimas antioxidantes no início do processo germinativo são essenciais no controle dos efeitos ambientais sobre as sementes, a alfa amilase, por exemplo, é a principal responsável por disponibilizar carboidratos ao desenvolvimento inicial do embrião através da hidrólise do amido presente (FRANCO *et al.*, 2002).

Assim, uma melhor elucidação quanto aos meios de tolerância a estresses bióticos e abióticos no início da formação e germinação de uma semente, possuem uma relevante importância nas pesquisas. De tal modo, que as atividades enzimáticas reguladoras da ação antioxidante entram como uma importante ferramenta da manutenção do equilíbrio diante de estresses.

## 2.4 Espécies reativas de oxigênio (EROs)

As mudanças climáticas tem aumentado a vulnerabilidade das plantas a estresses abióticos, em geral causam alterações nas atividades celulares, metabólicas e fisiológicas (HE; HE; DING, 2018). Cerca de 50% da produtividade é perdida devido aos efeitos ambientais sobre as culturas (SAINI *et al.*, 2018), isto ocorre, pois em geral, plantas submetidas às variações do ambiente promovem um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) nos tecidos, cujo acúmulo na célula causa o chamado estresse oxidativo (SIES; CADENAS, 1985).

As EROs são produtos naturais de organismos aeróbicos, participam da produção de energia, regulação do crescimento celular, sinalização intercelular, fagocitose, sistema de defesa e na síntese de substâncias biológicas (OZTETIK, 2011). Contudo, são substâncias letais e causam graves danos às proteínas, DNA e lipídios quando produzidas em excesso. Em arroz, causam oxidação de proteínas, inativação de enzimas, peroxidação lipídica, aumento da fluidez das membranas, degradação da clorofila e dano ao ácido nucléico (SHAH; CHATURVEDI; GUPTA, 2019)

O deficit hídrico é um importante promotor desses radicais livres, pois através das respostas da planta à sua incidência, é criado um ambiente propício à produção de EROs. No fechamento estomático, por exemplo, há uma redução dos níveis de CO<sub>2</sub>, esta diminuição gera um desequilíbrio entre as reações de luz da fotossíntese que produz energia (ATP e NADPH) com o ciclo de Calvin-Benson, responsável pelo consumo dessa energia, o que resulta numa superexcitação do fotossistema II, também ocorre um aumento da fotorrespiração e fotorredução do O<sub>2</sub> estimulando a produção de EROs na planta (ASADA, 2006; JALIL; AHMAD; ANSARI, 2017). Os principais compartimentos celulares produtores de EROs sob deficit hídrico são os cloroplastos, mitocôndrias, peroxissomos e apoplasto (FAROOQ *et al.*, 2009; SHARMA *et al.*, 2012), e elas são originadas de 1-2% de todo O<sub>2</sub> consumido pela planta (ASADA, 1987). Os produtos mais comuns derivados do oxigênio (O<sub>2</sub>) são o radical superóxido (O<sub>2</sub>•<sup>-</sup>), peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), radical hidroxila (OH•) e o oxigênio singleto (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>) (APEL; HIRT, 2004).

O superóxido é o primeiro radical a ser formado na célula, ele é moderadamente reativo com uma curta duração, é nucleofílico, e possui propriedades oxidantes e redutoras. Por ele são desencadeadas reações, enzimáticas ou não, que formam outros membros da família das EROs (HALLIWELL, 1977; VALKO; MORRIS; CRONIN, 2005).

O peróxido de hidrogênio é um elemento formado pela ação catalisadora da enzima

superóxido dismutase (SOD) sobre o  $O_2^{\bullet-}$ . Assim como o superóxido é moderadamente reativo, porém, com uma meia vida mais longa (BERWAL; RAM, 2018). A fotorrespiração e a oxidação de ácidos graxos são os principais meios de produção de  $H_2O_2$  (SHARMA *et al.*, 2012). Diferente dos outros radicais, o peróxido de hidrogênio causa danos longe do seu local de formação, o que faz dele, em baixas concentrações, um importante agente sinalizador de estresses na planta. Esta peculiaridade acontece porque o  $H_2O_2$  não possui elétrons desemparelhados, o que o torna mais estável conseguindo atravessar membranas (BIENERT *et al.*, 2007). Em altas concentrações este radical reduz aminoácidos e a atividade das enzimas essenciais ao ciclo de Calvin, intensificando a morte celular programada (FOYER; SHIGEOKA, 2011; SHARMA *et al.*, 2012).

O radical hidroxila é o mais reativo e tóxico dentre as EROs, tem alta interação com moléculas biológicas e causa inúmeros danos a níveis celulares (FOYER *et al.*, 1997). É formado por duas maneiras, através da reação entre o superóxido e o peróxido de hidrogênio e/ou pelas reações de Haber-Weiss e Fenton, respectivamente, que consiste na redução do  $Fe^{3+}$  pelo  $O_2^{\bullet-}$  e oxidação desse produto pelo  $H_2O_2$  (POSPISIL, 2016). As células não possuem mecanismo de eliminação desse radical, por isso, a principal forma de inibir sua formação é pela atividade das enzimas catalase (CAT) e peroxidase (APX), que possuem a função de catalizar o  $H_2O_2$  em água ( $H_2O$ ) (SHARMA *et al.*, 2012).

Diferente das outras EROs, o oxigênio singleto não é formado através de trocas de elétrons, mas, sua formação ocorre pela interação da clorofila em seu estado tripleto com o  $^3O_2$  (KIM; DOGRA, 2019; SINGH *et al.*, 2019). O fechamento estomático é um dos principais responsáveis por essa reação, pois, ao reduzir os níveis de  $CO_2$  nos cloroplastos, a cadeia transportadora de elétrons é afetada causando um desequilíbrio no fotossistema II, e este desequilíbrio gera um excesso de energia que ao ser dissipada por calor, fluorescência ou via sistema forma esta clorofila com grande afinidade ao oxigênio (SHARMA *et al.*, 2012; MATTOS; MORETTI, 2015)

Por mais que se tenha diversas ressalvas quanto a esses radicais, as EROs hoje são vistas como moléculas sinalizadoras e estão envolvidas em diversos processos fisiológicos naturais (BAXTER *et al.*, 2014). Contudo, para que se tenha essa visão de sinalização em plantas, as EROs devem estar em baixas concentrações e a produção de substâncias antioxidantes em equilíbrio, pois assim, é possível combater os efeitos danosos da superoxidação e promover nas plantas uma tolerância às respostas aos efeitos ambientais (DE OLIVEIRA, 2015).

## 2.5 Mecanismos de defesa

As espécies reativas de oxigênio são produtos comuns produzidos nos processos metabólicos de uma planta, contudo, em excesso, causam sérios danos às células. A fim de evitar este efeito citotóxico e manter o seu metabolismo normal, a planta possui um mecanismo de defesa por meio da atividade do complexo antioxidante que elimina os radicais responsáveis por esse estresse. Este mecanismo é responsável por mitigar os efeitos danosos da superprodução de EROs e é composto por enzimas ou componentes não-enzimáticos com ação antioxidante.

Em condições normais, o potencial tóxico dos metabólitos de oxigênio é baixo, devido ao equilíbrio entre a produção e a eliminação das espécies reativas de oxigênio. Entretanto, sob déficit hídrico é criado um ambiente propício à geração dessas substâncias, o que faz a planta passar por mudanças fisiológicas e bioquímicas que resultam numa desordem a níveis celulares de EROs com a capacidade de atuação do mecanismo de defesa antioxidante (SERKEDJIEVA, 2011).

No geral, este desequilíbrio entre a produção e neutralização das EROs chamado estresse oxidativo tem efeito negativo sobre lipídios, proteínas e ácidos nucleicos das células. Especificamente, quando submetida à falta d'água, a planta tem um incremento na produção de EROs, como relatado por Saha *et al.* (2018) e Liu *et al.* (2019) que observaram aumento na concentração de superóxido e peróxido de hidrogênio em plantas de arroz submetidas ao déficit hídrico. Isto ocorre, pois com o fechamento estomático, em resposta natural a esse tipo de estresse, há uma redução na assimilação de CO<sub>2</sub> alterando as atividades fotossintéticas e fotorrespiratórias (ASADA, 1999; HASANUZZAMAN *et al.*, 2020).

Com isso, é ressaltada a importância dos estudos envolvendo a relação da capacidade da planta em produzir componentes responsáveis pela manutenção do seu equilíbrio endógeno com a incidência dos efeitos ambientais, pois, plantas superiores possuem níveis maiores de compostos antioxidantes promovendo maior tolerância a estresses como a seca (SHARMA; JHA; DUBEY, 2010). Ning *et al.* (2010) relatam que em plantas tolerantes, a produção de EROs é reduzida e a capacidade de neutralização da mesma é maior através da ação do complexo enzimático.

As enzimas são substâncias fundamentais para o mecanismo de tolerância a seca como a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidases (POX) com ação antioxidante, atuando na converção das formas tóxicas em não tóxicas das EROs.

Nas células a SOD é o primeiro agente de defesa contra as EROs, realiza a dismutação

e redução dos íons de superóxido em  $H_2O_2$  e  $O_2$ . A SOD está presente em todos os compartimentos capazes de realizar transporte de elétrons, ou seja, suscetíveis ao estresse oxidativo, encontrados principalmente nos cloroplastos e mitocôndrias (LUIS *et al.*, 2018), e são classificadas em três isoenzimas de acordo com seu metal de ligação, sendo MnSOD, FeSOD e Cu/ZnSOD (MITTLER, 2002). Na literatura, é possível encontrar estudos que realacionam a tolerância de plântulas de arroz à seca com a maior presença e atividade da superóxido dismutase (MELANDRI *et al.*, 2020; NASRIN *et al.*, 2020)

As CAT possuem diferentes isoformas nos vegetais, são as principais responsáveis pela neutralização do peróxido de hidrogênio em água e oxigênio molecular, e estão presentes nos peroxissomas. É dividida em três classes, a primeira são aquelas presentes nos tecidos fotossintéticos com a função de remover o peróxido de hidrogênio oriundo da fotorrespiração, a segunda classe, são as catalases presentes nos tecidos vegetais vascularizados e, a terceira classe são as catalases encontradas em sementes e plântulas, cuja atividade é a remoção do peróxido de hidrogênio produzido durante a degradação dos ácidos graxos (SHARMA *et al.*, 2012).

Presentes em todos os organismos, as APX catalisam a intoxicação de peróxido de hidrogênio e outros peróxidos em água (BHATT, 2011). Estão presentes em diversos compartimentos celulares, e em plantas superiores são encontradas em diferentes isoformas no citosol, estroma, tilacóide, mitocôndria e peroxissoma (SHARMA E DUBEY, 2004). Por serem amplamente distribuídas nas células e possuírem maior afinidade com o  $H_2O_2$ , as peroxidases são extremamente eficientes na limpeza de EROs em condições estressantes (WANG; ZHANG; ALLEN, 1999). Sharma e Dubey (2005) notaram que, em condições extremas de seca, a atividade da APX é reduzida, o que corrobora com o trabalho de Yang *et al.* (2009) que encontraram correlação entre a tolerância ao déficit hídrico com a maior atividade das enzimas APX em plantas de arroz .

Sabendo-se então, que condições estressantes como a falta de água geram um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio, e que estas promovem o estresse oxidativo nas células, estudos visando a compreensão da concentração de substâncias antioxidantes, principalmente nas fases iniciais de desenvolvimento da planta, com o combate aos efeitos negativos das EROs é de extrema importância para o entendimento dos mecanismos de tolerância a estresses abióticos na cultura do arroz.

## REFERÊNCIAS

- AILI, W. *et al.* Effect of soil drought on electron transport rate and photophosphorylation level of different green organs in wheat. **Zuo Wu Xue Bao**, [s.l.], v. 30, n. 5, p. 487-490, 2004.
- AL-GHZAWI, A. A. *et al.* The impacts of drought stress on bee attractively and flower pollination of *Trigonella moabitica* (fabaceae). **Arch Agron Soil Sci**, [s.l.], v. 55, n. 6, p. 683-692, 2009.
- APEL, K.; HIRT, H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. **Annu. Rev. Plant Biol.**, [s.l.], v. 55, p. 373-399, 2004.
- ASADA, K. Production and scavenging of active oxygen in photosynthesis. **Photo-Inhibition**. Amsterdam: Elsevier, 1987. p. 227-287.
- \_\_\_\_\_. The water-water cycle in chloroplasts: scavenging of active oxygens and dissipation of excess photons. **Annual Review of Plant Biology**, [s.l.], v. 50, n. 1, p. 601-639, 1999.
- BAHUGUNA, R. N. *et al.* Mild preflowering drought priming improves stress defences, assimilation and sink strength in rice under severe terminal drought. **Functional Plant Biology**, [s.l.], v. 45, n. 8, p. 827-839, 2018.
- BARNABÁS, B.; JÄGER, K.; FEHÉR, A. The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. **Plant, Cell & Environment**, [s.l.], v. 31, n. 1, p. 11-38, 2008.
- BERWAL, M.; RAM, C. Superoxide dismutase: A stable biochemical marker for abiotic stress tolerance in higher plants. **Abiotic and Biotic Stress in Plants**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], p. 1-10, 2018.
- BHATTACHARJEE, S. Reactive oxygen species and oxidative burst: Roles in stress, senescence and signal transduction in plants. **Current Science**, p. 1113-1121, 2005.
- BIENERT, G. P. *et al.* Specific aquaporins facilitate the diffusion of hydrogen peroxide across membranes. **Journal of Biological Chemistry**, [s.l.], v. 282, n. 2, p. 1183-1192, 2007.
- BOUMAN, B. A. M. *et al.* Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice systems. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 74, n. 2, p. 87-105, 2005.
- BOYER, J. S.; WESTGATE, M. E. Grain yields with limited water. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 55, n. 407, p. 2385-2394, 2004.
- CHAVES, M. M.; OLIVEIRA, M. M. Mechanisms underlying plant resilience to water deficits: prospects for water-saving agriculture. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 55, n. 407, p. 2365-2384, 2004.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, v. 8, safra 2020/21, n. 12, décimo levantamento, julho. 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br> . Acesso em: 20 jul. 2021.

- DHAKAREY, R. *et al.* Physiological and proteomic analysis of the rice mutant *cpm2* suggests a negative regulatory role of jasmonic acid in drought tolerance. **Frontiers In Plant Science**, [s.l.], v. 8, p. 1903, 2017.
- DOGRA, V.; KIM, C. Singlet oxygen metabolism: From genesis to signaling. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 10, p. 1640, 2020.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT database: agriculture production, 2019**. Disponível em: <http://www.fao.org/home/en/>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- FAROOQ, M. *et al.* Plant drought stress: effects, mechanisms and management. **Agron. Sustain.**, [s.l.], v. 29, p. 185–212, 2009.
- FAROOQ, M.; BARSA, S.; WAHID, A. Priming of field-sown rice seed enhances germination, seedling establishment, allometry and yield. **Plant growth regulation**, [s.l.], v. 49, n. 2, p. 285-294, 2006.
- FOYER, C. H. *et al.* Hydrogen peroxide-and glutathione-associated mechanisms of acclimatory stress tolerance and signalling. **Physiologia Plantarum**, [s.l.], v. 100, n. 2, p. 241-254, 1997.
- FOYER, C. H.; SHIGEOKA, S. Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis. **Plant Physiology**, [s.l.], v. 155, n. 1, p. 93-100, 2011.
- GUIMARÃES, C. M. *et al.* Sistemas de cultivo. In: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **A cultura de arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 96 p.
- HALLIWELL, BARRY. Generation of hydrogen peroxide, superoxide and hydroxyl radicals during the oxidation of dihydroxyfumaric acid by peroxidase. **Biochemical Journal**, [s.l.], v. 163, n. 3, p. 441-448, 1977.
- HASANUZZAMAN, M. *et al.* Regulation of reactive oxygen species metabolism and glyoxalase systems by exogenous osmolytes confers thermotolerance in *Brassica napus*. **Gesunde Pflanzen**, [s.l.], v. 72, n. 1, p. 3-16, 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores IBGE. **Estatística da produção agrícola 2021**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- JALIL, S. U.; AHMAD, I.; ANSARI, M. I. Functional loss of GABA transaminase (GABA-T) expressed early leaf senescence under various stress conditions in *Arabidopsis thaliana*. **Current Plant Biology**, [s.l.], v. 9, p. 11-22, 2017.
- JIN, Y. *et al.* Rice male development under drought stress: phenotypic changes and stage-dependent transcriptomic reprogramming. **Molecular plant**, [s.l.], v. 6, n. 5, p. 1630-1645, 2013.



- KHADRAJI, A. *et al.* Growth and antioxidant responses during early growth of winter and spring chickpea (*Cicer arietinum*) under water deficit as affected by osmopriming. **Seed Science and Technology**, [s.l.], v. 45, n. 1, p. 198-211, 2017.
- LIU, J. *et al.* High temperature and drought stress cause abscisic acid and reactive oxygen species accumulation and suppress seed germination growth in rice. **Protoplasma**, [s.l.], v. 256, n. 5, p. 1217-1227, 2019.
- LUIS, A. *et al.* Plant superoxide dismutases: function under abiotic stress conditions. In: **Antioxidants and Antioxidant Enzymes in Higher Plants**. Springer, Cham, 2018. p.1-26.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Piracicaba: ABRATES, 2015. 659 p.
- MATTOS, L. M.; MORETTI, C. L. Oxidative stress in plants under drought conditions and the role of different enzymes. **Enzyme Engineering**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 1-6, 2015.
- MELANDRI, G. *et al.* Biomarkers for grain yield stability in rice under drought stress. **Journal of experimental botany**, [s.l.], v. 71, n. 2, p. 669-683, 2020.
- MENDEZ DEL VILLAR, P; FERREIRA, C. M. Dinâmicas territoriais do arroz de terras altas na região Centro-Oeste do Brasil. **Cadernos de Ciência e Tecnologia**, v. 22, n. 1, p. 97-107, 2005.
- MILLER, G. A. D. *et al.* Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, Cell & Environment**, [s.l.], v. 33, n. 4, p. 453-467, 2010.
- MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, [s.l.], v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002.
- NASRIN, S. *et al.* Impacts of drought stress on growth, protein, proline, pigment content and antioxidant enzyme activities in rice (*Oryza sativa* L. var. BRRI dhan- 24). **Dhaka University Journal of Biological Sciences**, [s.l.], v. 29, n. 1, p. 117-123, 2020.
- NISHIYAMA, I. Climatic influence on pollen formation and fertilization. **Biology Of Rice**, [s.l.], v. 153, p. 171, 1984.
- OCHATT, S. J. Agroecological impact of an in vitro biotechnology approach of embryo development and seed filling in legumes. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 35, n. 2, p. 535-552, 2015
- PESKE, S. T.; VILLELA, F. A.; MENEGHELLO, G. E. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. 3. ed. Pelotas: UFPel, 2012.
- POSPÍŠIL, P. Production of reactive oxygen species by photosystem II as a response to light and temperature stress. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 7, p. 1950, 2016.
- RICARDO, T. R. **Viabilidade econômica e risco das principais culturas anuais no município de Rio Verde (GO)**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SAHA, I. *et al.* Cellular response of oxidative stress when sub1A QTL of rice receives water deficit stress. **Plant Science Today**, [s.l.], v. 5, n. 3, p. 84-94, 2018.

SAMARAH, N. H. *et al.* The effect of late-terminal drought stress on yield components of four barley cultivars. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s.l.], v. 195, n. 6, p. 427-441, 2009.

SAMARAH, N.; ALQUDAH, A. Effects of late-terminal drought stress on seed germination and vigor of barley (*Hordeum vulgare* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s.l.], v. 57, n. 1, p. 27-32, 2011.

SEVANTO, S. Phloem transport and drought. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 65, n. 7, p. 1751-1759, 2014.

SHAH, K.; CHATURVEDI, V.; GUPTA, S. Climate Change and Abiotic Stress- Induced Oxidative Burst in Rice. *In: Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. Woodhead Publishing, 2019. p. 505-535.

SHARMA, P. *et al.* Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, [s.l.], [s.v.], [s.n.], 2012.

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S. Oxidative stress and antioxidative defense system in plants growing under abiotic stresses. *In: Handbook of Plant and Crop Stress, Fourth Edition*. CRC press, 2019. p. 93-136.

SHEORAN, I. S.; SAINI, H. S. Drought-induced male sterility in rice: changes in carbohydrate levels and enzyme activities associated with the inhibition of starch accumulation in pollen. **Sexual Plant Reproduction**, [s.l.], v. 9, n. 3, p. 161-169, 1996.

SIES, H.; CADENAS, E. Oxidative stress: damage to intact cells and organs. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. **B, Biological Sciences**, Londres, v. 311, n. 1152, p. 617-631, 1985.

SINGH, A. *et al.* Reactive oxygen species-mediated signaling during abiotic stress. **Plant Gene**, [s.l.], v. 18, p. 100173, 2019.

SMICIKLAS, K. D. *et al.* Soybean seed quality response to drought stress and pod position. **Agronomy Journal**, [s.l.], v. 84, n. 2, p. 166-170, 1992.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil/XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**. Bento Gonçalves, RS: SOSBAI, 2016

TOUNEKTI, T. *et al.* Priming improves germination and seed reserve utilization, growth, antioxidant responses and membrane stability at early seedling stage of Saudi sorghum varieties under drought stress. **Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**, [s.l.], v. 48, n. 2, p. 938-953, 2020.

VALKO, M.; MORRIS, H.; CRONIN, M. T. D. Metals, toxicity and oxidative stress. **Current Medicinal Chemistry**, [s.l.], v. 12, n. 10, p. 1161-1208, 2005.

WANDER, A. L. A cultura. *In*: BORÉM, A.; RANGEL, P. H. N. **Arroz do plantio a colheita**. 1 ed. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 2015. V.1 , p. 9-26.

WANG, H. *et al.* Effects of water stress on reactive oxygen species generation and protection system in rice during grain-filling stage. **Agricultural Sciences in China**, [s.l.], v.9, n. 5, p. 633-641, 2010.

WANG, J.; ZHANG, H.; ALLEN, R. D. Overexpression of an Arabidopsis peroxisomal ascorbate peroxidase gene in tobacco increases protection against oxidative stress. **Plant and Cell Physiology**, [s.l.], v. 40, n. 7, p. 725-732, 1999.

YANG, Z. *et al.* OsMT1a, a type 1 metallothionein, plays the pivotal role in zinc homeostasis and drought tolerance in rice. **Plant Molecular Biology**, [s.l.], v. 70, n. 1, p. 219-229, 2009.

YU, S.; LO, S.; HO, T.D. Source–sink communication: regulated by hormone, nutrient, and stress cross-signaling. **Trends in Plant Science**, [s.l.], v. 20, n. 12, p. 844-857, 2015.

## CAPÍTULO 2 QUALIDADE DE SEMENTES DE ARROZ PRODUZIDAS EM CONDIÇÕES DE DEFICIT HÍDRICO

### RESUMO

A qualidade fisiológica de sementes é um importante parâmetro para avaliar a capacidade de um material em formar uma planta, assim, sua utilização para seleção de genótipos mais vigorosos torna-se necessária, principalmente quando se quer avaliar o efeito de estresses ambientais sobre diferentes genótipos. Com isso, o objetivo deste trabalho foi caracterizar diferentes linhagens de arroz de terras altas quanto a qualidade fisiológica e desenvolvimento das plântulas para tolerância a incidência de seca no período reprodutivo e produção das sementes. Foram utilizados sete genótipos do programa de melhoramento de arroz de terras altas do convênio entre a UFLA, EPAMIG E EMBRAPA, sendo a cultivar BRSM-Relâmpago classificada como tolerante e testemunha. Estes genótipos foram obtidos da safra 2018/19 produzidos em duas condições de campo, a primeira com irrigação suplementar durante todo o ciclo da cultura, e a segunda foi induzida ao estresse hídrico na fase reprodutiva, antes da emissão da panícula. Foram feitos os testes de germinação, índice de velocidade de germinação, primeira contagem (5º DAS), emergência em substrato a 70 e a 10% da capacidade de campo, índice de velocidade de emergência e desenvolvimento das plântulas oriundas do teste de germinação na primeira contagem, medidas com o auxílio do equipamento GroundEye, o qual mensurou a parte aérea, a raiz principal e a razão raiz/parte aérea. Devido à grande variabilidade dos resultados, os testes de germinação e os de vigor mostraram ser capazes de diferenciar diferentes genótipos de arroz de terras altas, com isso, é visto que a linhagem CMG2172 foi a que mais sentiu o efeito da seca, apresentando diferença entre os campos de produção e os menores índices para a maioria dos resultados. Com o teste de desenvolvimento das plântulas foi observado que o crescimento das raízes está correlacionado com aqueles genótipos de melhor qualidade fisiológica, ou seja, materiais com maior viabilidade e vigor apresentam maior crescimento das raízes, e a linhagem CMG2093 foi, em condições de estresse, a que apresentou os maiores valores. Assim, foram selecionados os materiais CMG2172 como suscetível e o CMG2093 como tolerante à seca.

Palavras chave: *Oriza sativa* sp. Desenvolvimento de plântulas. Qualidade de semente. Germinação. Emergência. Seca.

## PHYSIOLOGICAL ANALYZES OF RICE SEEDS PRODUCED UNDER WATER DEFICIT CONDITIONS

### ABSTRACT

The physiological quality of seeds is an important parameter to assess the capacity of a material to form a plant, so its use for selection of more vigorous materials becomes necessary especially when one wants to assess the effect of environmental stresses on different genotypes. Thus, the objective of this work was to characterize different upland rice lines regarding the physiological quality and development of seedlings for tolerance to drought incidence in the reproductive period and seed production. Seven genotypes from the upland rice breeding program of the agreement between UFLA, EPAMIG and EMBRAPA were used, with the cultivar BRSM-Relâmpago classified as tolerant and control. These materials were obtained from the 2018/19 crop produced under two field conditions, the first with supplementary irrigation throughout the crop cycle and the second was induced water stress in the reproductive phase, before panicle emission. The germination tests, germination speed index, first count (5th DAS), emergence in substrate at 70 and 10% of field capacity, emergence speed index and seedling development from the germination test in the first were performed count measured with the aid of the GroundEye equipment, which measured the aerial part, the main root and the root/shoot ratio. Due to the great variability of the results, the germination and vigor tests showed to be able to differentiate different genotypes of upland rice, with this, it is seen that the CMG2172 strain was the one that most felt the effect of the drought, showing a difference between the production fields and the lowest rates for most results. With the seedling development test, it was observed that root growth is correlated with those materials of better physiological quality, that is, materials with greater viability and vigor have greater root growth, and the line CMG2093 was under stress conditions that presented the highest values. Thus, materials CMG2172 were selected as susceptible and CMG2093 as drought tolerant.

Key-words: *Oriza sativa* sp. Seedling development. Seed quality. Germination. Emergence. Drought.

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz é um dos principais cereais produzidos no mundo, é um alimento presente em diversas culturas, e está inserido na alimentação diária de pelo menos 2/3 da população mundial, sendo os maiores consumidores e produtores os países asiáticos (FAO, 2019).

Para o brasileiro, a cultura detém uma importância muito grande a respeito da segurança alimentar, pois, além de ser um alimento de menor valor em relação a outros cereais, apresenta valores nutricionais muito relevantes à dieta humana, o que torna este alimento um importante agente no combate a fome no país (SOSBAI, 2016).

Segundo o levantamento feito pelo CONAB (2021), na safra 2020/21, o país produziu pouco mais de 11 toneladas de arroz, o que o colocou entre os dez maiores produtores do mundo. Contudo, o país concentra grande parte da sua produção no cultivo de forma irrigada, mesmo o de sequeiro possuindo grande importância no controle de preços e equilíbrio dos estoques nacionais (RICARDO, 2010; WANDER, 2015). A cultura de sequeiro também detém uma importância histórica no aumento das atividades agrícolas no cerrado, foi a principal cultura para abertura de novas áreas e até hoje é utilizada no preparo do solo para outras culturas (GUIMARÃES *et al.*, 2006; MENDEZ DEL VILLAR; FERREIRA, 2005).

Os estados do Mato Grosso e Tocantins são os que apresentam as maiores áreas de cultivo de arroz de sequeiro, porém, a insegurança dos produtores dessa região em relação à produção faz com que sejam negligenciados os cultivos, acarretando baixas produtividades (IBGE, 2021). Este desequilíbrio pluviométrico característico dessas regiões, afeta o período mais sensível da cultura, geralmente ocorre no período reprodutivo da planta causando danos irreversíveis, o que compromete tanto a qualidade das sementes quanto a produção (TUONG *et al.*, 2000; BAHUGUNA *et al.*, 2018). Estima-se que a cultura perca 18 milhões de toneladas devido ao déficit hídrico por ano (DHAKAREY *et al.* 2017).

Esta incidência no período reprodutivo tem impacto direto tanto na questão mais relevante aos produtores, a produtividade, quanto para a qualidade das sementes, que são as responsáveis por transferir toda a tecnologia genética ao campo. Isto acontece devido à resposta a falta de água da cultura afetar a produção e o transporte dos produtos oriundos da fotossíntese, que juntamente ao aumento do estresse oxidativo gerado pelo acúmulo de radicais livres, altera a síntese de tecidos de reserva das sementes ocasionando perdas da sua qualidade (OCHATT, 2015).

Segundo Marcos Filho (2015) a qualidade das sementes é um fator essencial para se obter genótipos com melhor resposta a adversidades, principalmente no início do

desenvolvimento da planta, pois, genótipos de melhor qualidade apresentam maior porcentagem de germinação, maior velocidade e uniformidade de emergência e um maior desenvolvimento inicial de plântulas.

Assim, o Brasil, possuindo uma extensa área em potencial para o seu cultivo e podendo entrar na dinâmica agrícola do cerrado como uma cultura no manejo de rotação, os estudos quanto a tolerância à seca, envolvendo a qualidade de sementes do arroz de terras altas, possuem extrema importância, pois, com o aumento da demanda mundial por alimento cada vez maior, e a preocupação por questões ambientais mais presentes no mercado, o aproveitamento de áreas já utilizadas é essencial e necessário para uma produção mais rentável.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar diferentes linhagens de arroz de terras altas quanto a qualidade fisiológica e desenvolvimento das plântulas para tolerância à incidência de seca no período reprodutivo e produção das sementes.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram conduzidas no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS) do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras – MG. Foram utilizadas sementes do programa de melhoramento de arroz de terras altas do convênio entre a Universidade Federal de Lavras, EPAMIG e EMBRAPA Arroz e feijão. As sementes utilizadas foram produzidas na safra 2018/19 na cidade de Porangatu – GO.

Dentre as linhagens trabalhadas foram selecionados sete genótipos, sendo a BRSMG Relâmpago caracterizada como tolerante ao déficit hídrico e usada como testemunha (CASTRO *et al.*, 2014). As demais cultivares trabalhadas foram: CMG 2172, CMG 2185, CMG 1511, CMG 2093, CMG 2085 e CMG 1987.

Logo após o recebimento das sementes foi realizado o teor de água médio dos genótipos seguindo a metodologia sugerida na Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Foi utilizada duplicata dos genótipos, o qual cada amostra continha 25 sementes, em seguida colocadas em estufa com circulação forçada de ar a  $105\text{ °C} \pm 1$  por 24h.

O teste de germinação foi feito em quatro repetições de 25 sementes semeadas em rolos com três folhas de papel germitest umedecidas 2,5 vezes ao peso seco do papel. Os rolos semeados foram colocados em germinadores com temperatura e umidade controlada a  $25\text{ °C}$ .

Os resultados foram expressos em porcentagens, as leituras foram feitas conforme estabelecido pela RAS com a primeira contagem no quarto dia após a semeadura e a contagem final no décimo quarto dia (BRASIL, 2009). O índice de velocidade de germinação foi realizado concomitantemente ao teste de germinação segundo estipulado por Maguire (1962).

Para o teste de emergência foram semeadas quatro repetições de 25 sementes em bandejas de acrílico com substrato solo + areia na proporção 2:1 e umedecidos em duas condições de restrição de água, a 10% e 70% da capacidade de campo. As bandejas foram mantidas em câmara de crescimento vegetal à temperatura constante de  $25\text{ °C}$  e irrigadas diariamente para a manutenção da capacidade de retenção de água estabelecida através da diferença de peso das bandejas a cada 24h.

A leitura foi feita ao décimo quarto dia após a semeadura, sendo computadas as plântulas que tiveram o hipocótilo totalmente fora do substrato. Os resultados foram expressos em porcentagem para a definição do valor de emergência. O índice de velocidade



de emergência foi feito concomitantemente ao teste de emergência, foram contadas diariamente as plântulas que apresentaram o hipocótilo fora do substrato, segundo Maguire (1962).

A medição do desenvolvimento das plântulas foi determinada por meio do sistema de captura de imagem GroundEye<sup>®</sup> (versão S800). As plântulas utilizadas são oriundas do teste de germinação e as leituras foram feitas no dia da primeira contagem com as plântulas consideradas normais. Foram extraídos valores das características das plântulas como o comprimento da raiz (CR), comprimento de parte aérea (CPA) e a razão do comprimento da raiz pelo comprimento da parte aérea (CR/CPA).

Para as análises fisiológicas das sementes foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial (7x2), sendo sete genótipos e duas condições de campo para produção de sementes (com e sem irrigação). Os resultados foram submetidos à análise de variância, utilizando o Teste F, e a comparação das médias dos tratamentos para todos os testes foi feita pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As sementes possuíam um teor médio de água de 13,05 %, o que predispõe as mesmas ao armazenamento e análises por estarem no intervalo de grau de umidade considerado ideal.

Para a porcentagem de germinação, foi visto valores distintos entre os genótipos quando analisado as sementes obtidas pelo manejo sem irrigação (TABELA 1), sendo a porcentagem da Relâmpago e dos genótipos CMG1511, CMG2093 e CMG1987 maiores com relação aos genótipos CMG2172 e CMG2185, que apresentaram resultados inferiores aos demais. Estes resultados mostram que, quando submetidas à restrição hídrica em campo, sementes de arroz respondem de forma diferente à qualidade das sementes. Quando analisadas as sementes obtidas em ambientes com irrigação, novamente a linhagem 2 apresentou resultado inferior à testemunha (Relâmpago) e ao material 5, os demais genótipos não diferiram estatisticamente das linhagens já citadas.

Os dados referentes ao vigor, determinados pelo índice de velocidade de germinação (IVG) e primeira contagem (TABELA 1), mostram diferenças mais distintas entre os genótipos, muito disso é devido ao teste de germinação apresentar o potencial da semente em condições ideais. Assim, observando o IVG em sementes em ambiente sem irrigação, é visto que a linhagem CMG2172 apresentou resultado inferior ao observado da linhagem CMG1511 que obteve a maior média, tendo a testemunha e a linhagem CMG2093 iguais estatisticamente. Analisando em condição com irrigação, resultado semelhante é notado, a testemunha e a linhagem CMG1511 possuem as maiores médias com a linhagem CMG2185 apresentando os menores resultados.

Para o parâmetro da primeira contagem dos genótipos provenientes do ambiente sem irrigação nota-se os mesmos resultados do IVG, a linhagem CMG2172 apresentou a menor média junto com a linhagem CMG1085, sendo as maiores médias vista para a testemunha e as linhagens CMG1511 e CMG2093.

Antes e durante a formação das sementes, a disponibilidade hídrica é um fator que exerce grande influência na qualidade das sementes, principalmente nos períodos de florescimento e enchimento dos grãos, pois estes refletem diretamente sobre a viabilidade e vigor dessas sementes (CARVALHO; NAKAGAWA, 2012). Silva *et al.* (2014) verificaram, que a menor disponibilidade hídrica na fase reprodutiva tem efeito distinto entre cultivares de arroz, e que estas diferenças na qualidade fisiológica são em detrimento dos danos causados pela seca na formação das sementes. Com a relação às respostas de cada genótipo nas duas condições de campo de produção, apenas a linhagem CMG2172 apresentou queda na

qualidade nos três parâmetros observados, o que sugere que este material foi mais suscetível a incidência da seca na formação da semente.

Genótipos suscetíveis à seca durante a fase reprodutiva apresentam um desenvolvimento de sementes mais rápido, com uma maturação mais precoce e um menor período para enchimento das sementes, por outro lado, genótipos tolerantes tendem a priorizar a formação e qualidade das suas sementes, para que estas consigam gerar plântulas mais vigorosas (YU *et al.*, 2015; RAHMAN; ELLIS, 2019).

Tabela 1 - Germinação (%), Índice de Velocidade de Germinação e Primeira Contagem em sementes de arroz produzidas com duas condições de campo, com e sem irrigação, de sete genótipos genéticos diferentes.

Germinação %		
Genótipos	Condição ambiental	
	S/ irrigação	C/ irrigação
CMG2172	66 Bb	82 ABa
CMG2185	65 Ba	74 Ba
CMG1085	79 ABa	86 ABa
BRSMG Relâmpago	88 Aa	95 Aa
CMG1511	86 Aa	95 Aa
CMG2093	86 Aa	86 ABa
CMG1987	88 Aa	90 ABa
CV (%)	9,23	
Índice de Velocidade de Germinação (IVG)		
Genótipos	Condição ambiental	
	S/ irrigação	C/ irrigação
CMG2172	8,134 Db	10,306 ABCa
CMG2185	8,854 CDa	8,796 Ca
CMG1085	8,905 BCDb	10,313 ABCa
BRSMG Relâmpago	10,419 ABb	11,779 Aa
CMG1511	10,874 Aa	11,875 Aa
CMG2093	10,569 ABa	10,833 ABa
CMG1987	10,246 ABC Aa	9,709 BCa
CV (%)	7,98	
Primeira contagem (5° DAS)		
Genótipos	Condição ambiental	
	S/ irrigação	c/ irrigação
CMG2172	62 Bb	85 ABa
CMG2185	70 ABa	69 Ba
CMG1085	65 Bb	82 ABa
BRSMG Relâmpago	83Aa	89 Aa
CMG1511	84 Aa	94 Aa
CMG2093	84 Aa	84 ABa
CMG1987	76 ABa	81 ABa
CV (%)	9,39	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, aos 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021).

Para a avaliação da emergência submetida à simulação de restrição hídrica (TABELA 2) são observadas respostas semelhantes aos testes anteriores. A linhagem CMG2172 apresentou resultado inferior comparada em campos de produção sem irrigação aos genótipos CMG2093 e CMG1987. Para sementes obtidas em ambientes com irrigação a emergência

apresentou a testemunha como a linhagem com a maior porcentagem e sendo superior às linhagens CMG2172 e CMG2185. Apenas a testemunha apresentou diferença entre os campos de produção. Estes testes são essenciais para analisar a capacidade de um material em se estabelecer em campo, principalmente quando há possibilidade de incidência de algum tipo de estresse, pois, sementes mais vigorosas mobilizam melhor suas reservas para o desenvolvimento de plântulas, o que favorece a adaptação a adversidades (MARCOS FILHO, 2015)

Para o índice de velocidade de emergência na condição de simulação de déficit hídrico, não se observou diferença significativa entre as linhagens independente da condição de campo de produção.

Tabela 2 - Emergência (%) em sementes de arroz produzidas com duas condições de campo, com e sem irrigação, de sete genótipos genéticos diferentes submetidos à capacidade de campo de 10%.

Genótipos	Emergência (%)	
	Condição ambiental	
	S/ irrigação	c/ irrigação
CMG2172	67 Ba	65 Ca
CMG2185	83 ABa	72 BCa
CMG1085	88 ABa	80 ABCa
BRSMG Relâmpago	82 ABb	97 Aa
CMG1511	88 ABa	92 ABa
CMG2093	97 Aa	85 ABCa
CMG1987	95 Aa	90 ABa
CV (%)	12,92	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, aos 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021).

Quando simulado o teste de emergência em condições sem restrição hídrica (TABELA 3), as sementes produzidas em campos sem irrigação tiveram como resultado as linhagens CMG1511, CMG2093 e CMG2185 as maiores porcentagens de emergência, sendo estatisticamente superiores a linhagem 1. Já para as sementes produzidas sob irrigação, as linhagens CMG2172 e CMG2185 apresentaram menor desempenho comparadas a testemunha e as linhagens CMG1511 e CMG2093.

Já o índice de velocidade de emergência, os resultados foram semelhantes aos do teste de emergência. Para condição de campo de produção sem irrigação a linhagem 1 apresentou menor resultado comparando com as linhagens CMG1511, CMG2093 e CMG1987. Já em condições de campo irrigado a linhagem CMG2093 foi superior as

linhagens CMG2172, CMG2185 e CMG1987.

Tabela 3 - Emergência (%) e Índice de Velocidade de Emergência (IVE) em sementes de arroz produzidas com duas condições de campo, com e sem irrigação, de sete genótipos gnéticos diferentes submetidos à capacidade de campo de 70%.

Genótipos	Emergência (%)	
	Condição ambiental	
	S/ irrigação	c/ irrigação
CMG2172	70 Ba	72 BCa
CMG2185	79 ABa	68 Ca
CMG1085	84 ABa	90 ABa
BRSMG Relâmpago	82 ABa	91 Aa
CMG1511	92 Aa	91 Aa
CMG2093	93 Aa	93 Aa
CMG1987	90 Aa	86 ABCa
CV (%)	10,11	
Genótipos	Índice de Velocidade de Emergência (IVE)	
	Condição ambiental	
	S/ irrigação	c/ irrigação
CMG2172	2,992 Ca	3,138 BCa
CMG2185	3,275 BCa	2,857 Ca
CMG1085	3,5 ABCa	3,717 ABCa
BRSMG Relâmpago	3,392 ABCa	3,887 ABa
CMG1511	4,276 Aa	3,951 ABa
CMG2093	4,053 ABa	4,138 Aa
CMG1987	4,022 ABa	3,191 BCb
CV (%)	16,05	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, aos 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021).

Ao avaliar o comprimento das plântulas no dia da primeira contagem (5° DAS) do teste de germinação (TABELA 4) é visto que, para o tamanho da parte aérea de plântulas provenientes de sementes produzidas em condição de campo sem irrigação, o maior valor observado é para a linhagem CMG1511, a qual foi superior estatisticamente às linhagens CMG2185, CMG1085 e CMG2093, não diferindo das demais. Já na condição de campo com irrigação a Relâmpago e a linhagem CMG1511 foram superiores, não apresentando diferença estatística apenas para a linhagem CMG2172.

A não diferença na maioria dos genótipos entre os campos de produção de sementes pode ser justificada pelo fato dessas sementes terem sido semeadas em condição ideal de cultivo em um curto período de tempo, que são os princípios básicos do teste de germinação.

Contudo, a diferença entre os genótipos evidencia a variabilidade entre os materiais trabalhados. Outro fator que explica a não incidência do estresse sobre a parte aérea das linhagens é o fato de que plântulas de arroz são menos sensíveis a sinais de estresse hídrico para o parâmetro da parte aérea, principalmente no início do seu desenvolvimento, sendo o vigor das raízes mais benéfico ao estabelecimento das plântulas em campo (CHEN *et al.*, 2020).

Para o comprimento da raiz principal é observado resultado semelhante para as duas condições de campo de produção. Os genótipos CMG1511 e CMG2093 apresentaram os maiores valores em comparação aos demais e foram estatisticamente superiores a linhagem CMG2172 nas duas condições de campo de produção de sementes, mostrando que, mesmo em condições adversas, estes genótipos apresentam sementes com melhor capacidade de desenvolvimento radicular, que no início da formação de uma planta é essencial para o seu estabelecimento em campo. Estudos relatam a correlação da tolerância à seca com o maior desenvolvimento das raízes devido a maior profundidade em absorver água no solo, assim, as plantas que apresentam maior crescimento radicular se adaptam mais facilmente a ambiente com menor disponibilidade de água (JI *et al.*, 2012; VAN KEULEN; SELIGMAN, 1987).

Tabela 4 - Comprimento de plântulas (cm) produzidas no teste de germinação e medidas com GroundEye, de sete genótipos genéticos diferentes produzidos com duas condições de campo.

Hipocótilo		
Genótipos	Condição ambiental	
	S/ irrigação	C/ irrigação
CMG2172	2,34 ABa	2,49 ABa
CMG2185	2,06 BCa	2,14 BCa
CMG1085	1,81 Ca	1,87 Ca
BRSMG Relâmpago	2,29 ABb	2,68 Aa
CMG1511	2,53 Aa	2,52 Aa
CMG2093	1,97 BCa	1,91 Ca
CMG1987	2,16 ABCa	1,88 Cb
CV (%)	7,68	
Raíz		
Genótipos	Condição ambiental	
	S/ irrigação	C/ irrigação
CMG2172	3,19 Cb	4,03 Ca
CMG2185	4,36 BCa	4,85 BCa
CMG1085	4,30 BCb	5,44 ABa
BRSMG Relâmpago	4,42 Ba	5,05 BCa
CMG1511	4,81 ABb	6,42 Aa
CMG2093	6,01 Aa	5,5 ABa
CMG1987	4,33 BCa	4,66 BCa
CV (%)	11,4	
Raíz/Hipocótilo		
Genótipos	Condição ambiental	
	S/ irrigação	c/ irrigação
CMG2172	1,48 Ca	1,77 Ba
CMG2185	2,42 ABCa	2,45 ABa
CMG1085	2,54 ABCb	3,32 Aa
BRSMG Relâmpago	2,15 ABCa	2,04 Ba
CMG1511	1,99 BCa	2,7 ABa
CMG2093	3,32 Aa	3,42 Aa
CMG1987	2,92 ABa	3,27 Aa
CV (%)	21,05	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, aos 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021).

Com relação à razão entre raiz e parte aérea, é visto novamente a linhagem 6 com os maiores valores e sendo superior a linhagem CMG2172 nas duas condições de produção de sementes. Este parâmetro é um importante resultado que ajuda a compreender a prioridade de energia que as sementes utilizam para o desenvolvimento de uma plântula. A maior razão raiz/parte aérea em uma planta corresponde ao maior acúmulo de carboidratos e açúcares



solúveis no sistema radicular (XU *et al.*, 2015), o que demonstra que o genótipo CMG2093, no início do seu desenvolvimento tem como rota principal de destino de suas reservas, a radícula. Estudos atribuem que este maior crescimento das raízes em razão da parte aérea, é devido a maior tolerância das plantas, que em situação de restrição hídrica teriam maior capacidade de absorção de água do solo e menor perda por evapotranspiração (WU *et al.*, 2017; THOMAS *et al.*, 2020).

#### 4 CONCLUSÕES

Sementes de arroz, quando produzidas em condições de restrição hídrica, apresentam respostas fisiológicas e de desenvolvimento distintas, sendo possível identificar os genótipos tolerantes e não tolerantes.

O genótipo CMG2172 é o mais sensível à restrição hídrica, com redução de significativa de germinação e desenvolvimento de plântulas.

O genótipo CMG2093 se mostrou tolerante ao deficit hídrico durante o processo de produção de sementes, com resultados satisfatórios de qualidade.

## REFERÊNCIAS

- BAHUGUNA, R. N. *et al.* Mild preflowering drought priming improves stress defences, assimilation and sink strength in rice under severe terminal drought. **Functional Plant Biology**, [s.l.], v. 45, n. 8, p. 827-839, 2018.
- BRASIL. MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise desementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009.
- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. **Sementes: Ciência e Tecnologia de Produção**. Jaboticabal: FUNEP, 2012. 590 p.
- CHEN, Z. K. *et al.* Drought stress intensity, duration and its resistance impact on rice (*Oryza sativa* L.) seedling. **Applied Ecology and Environmental Research**, [s.l.], v. 18, n. 1, p. 469-486, 2020.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, v. 8, safra 2020/21, n. 12, décimo levantamento, julho. 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- DE CASTRO, A. P. *et al.* **BRS Esmeralda**: cultivar de arroz de terras altas com elevada produtividade e maior tolerância à seca. Embrapa Arroz e Feijão-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2014.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT database: agriculture production**, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/home/en/>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- GUIMARÃES, C. M. *et al.* Sistemas de cultivo. *In*: SANTOS, A. B.; STONE, L. F.; VIEIRA, N. R. A. **A cultura de arroz no Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2006. 96 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Indicadores IBGE. **Estatística da produção agrícola 2021**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- JI, K. *et al.* Drought-responsive mechanisms in rice genotypes with contrasting drought tolerance during reproductive stage. **Journal of Plant Physiology**, [s.l.], v. 169, n. 4, p. 336-344, 2012.
- KEULEN, H. V.; SELIGMAN, N. G. **Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop**. 1987.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination. Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor 1. **Crop Science**, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.
- MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Piracicaba: ABRATES, 2015. 659 p.

MARCOS, J. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. *Scientia Agricola*, [s.l.], v. 72, p. 363-374, 2015.

MENDEZ DEL VILLAR, P.; FERREIRA, C. M. Dinâmicas territoriais do arroz de terras altas na região Centro-Oeste do Brasil. *Cadernos de Ciência e Tecnologia*, [s.l.], v. 22, n. 1, p. 97-107, 2005.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. *In*: KRZYZANOSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. Cap. 2. p. 2-24.

OCHATT, S. J. Agroecological impact of an in vitro biotechnology approach of embryo development and seed filling in legumes. *Agronomy for Sustainable Development*, [s.l.], v. 35, n. 2, p. 535-552, 2015.

RAHMAN, S. M. A.; ELLIS, R. H. Seed quality in rice is most sensitive to drought and high temperature in early seed development. *Seed Science Research*, [s.l.], v. 29, n. 4, p. 238-249, 2019.

RICARDO, T. R. **Viabilidade econômica e risco das principais culturas anuais no município de Rio Verde (GO)**. 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

SILVA, V. N. *et al.* Morfologia interna e germinação de sementes de arroz de terras baixas produzidas em diferentes regimes hídricos. *Irriga*, [s.l.], v. 19, n. 3, p. 453-463, 2014.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil/XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**. Bento Gonçalves, RS: SOSBAI, 2016.

THOMAS, T. *et al.* Identification of rice genotypes for seedling stage multiple abiotic stress tolerance. *Plant Physiology Reports*, [s.l.], v. 25, n. 4, p. 697-706, 2020.

WANDER, A. L. A cultura. *In*: BORÉM, A.; RANGEL, P. H. N. **Arroz do plantio a colheita**. 1 ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2011. V. 1. p. 9-26.

WU, W. *et al.* Quantification of canola root morphological traits under heat and drought stresses with electrical measurements. *Plant and Soil*, [s.l.], v. 415, n. 1, p. 229-244, 2017.

XU, W. *et al.* Drought stress condition increases root to shoot ratio via alteration of carbohydrate partitioning and enzymatic activity in rice seedlings. *Acta Physiologia e Plantarum*, [s.l.], v. 37, n. 2, p. 9, 2015.

YU, S. *et al.* Source–sink communication: regulated by hormone, nutrient, and stress cross-signaling. *Trends in Plant Science*, [s.l.], v. 20, n. 12, p. 844-857, 2015.

### **CAPÍTULO 3 DESEMPENHO FISIOLÓGICO E BIOQUÍMICO DE SEMENTES E PLÂNTULAS DE ARROZ PRODUZIDAS EM CONDIÇÕES DE DEFICIT HÍDRICO**

#### **RESUMO**

As enzimas do complexo antioxidante possuem uma importante função no controle da homeostasia celular das plantas, elas inibem a ação tóxica das espécies reativas de oxigênio, quando estas estão em excesso. Diversas são as enzimas dentro desse grupo, contudo, a SOD, CAT e APX possuem destaque no processo de defesa, pois evitam que os radicais livres se transformem nas formas mais reativas e tóxicas as células. Assim, este trabalho possui como objetivo avaliar a atividade e expressão das enzimas do complexo antioxidante com relação à resposta a indução de estresse hídrico na fase reprodutiva em genótipos de arroz de terras altas. Foram utilizados três genótipos do programa de melhoramento de arroz de terras altas do convênio entre a UFLA, EPAMIG e EMBRAPA, sendo eles, o CMG2093, o CMG2172 e a cultivar BRSM- Relâmpago classificada como testemunha. Estes genótipos foram obtidos da safra 2018/19 produzidos em duas condições de campo, a primeira com irrigação suplementar durante todo o ciclo da cultura, e a segunda foi induzida ao estresse hídrico na fase reprodutiva, antes da emissão da panícula. As plântulas utilizadas nas análises das enzimas são oriundas dos testes de emergência e IVE em substrato (solo + areia na proporção 2:1) a 70 e a 10% da capacidade de campo. É observado grande diferença entre os genótipos diante dos testes de vigor, já para os testes bioquímicos, o genótipo CMG2093 foi o que menos sofreu com o déficit hídrico, apresentando os melhores desempenhos sob condição de restrição hídrica, podendo ser considerada tolerante a este tipo de estresse.

Palavras chave: *Oriza sativa* sp. SOD. CAT. APX. Antioxidante.

## PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PERFORMANCE OF RICE SEEDS AND SEEDLINGS PRODUCED UNDER WATER DEFICIT CONDITIONS

### ABSTRACT

The antioxidant complex enzymes play an important role in controlling plant cell homeostasis, they inhibit the toxic action of reactive oxygen species when they are in excess. There are several enzymes within this group, however SOD, CAT and APX are prominent in the defense process, as they prevent free radicals from becoming the most reactive and toxic forms in the cells. Thus, this work aims to evaluate the activity and expression of enzymes of the antioxidant complex in relation to the response to induction of water stress in the reproductive phase in upland rice genotypes. Three genotypes from the upland rice improvement program of the agreement between UFLA, EPAMIG and EMBRAPA were used, namely, CMG2093, CMG2172 and the cultivar BRSM-Relâmpago classified as a control. These materials were obtained from the 2018/19 crop produced under two field conditions, the first with supplementary irrigation throughout the crop cycle and the second was induced water stress in the reproductive phase, before panicle emission. The seedlings used in the enzyme analysis come from the emergence and IVE tests in substrate (soil + sand in the proportion 2:1) at 70 and 10% of field capacity. There is a great difference between the materials in the vigor tests, whereas for the biochemical tests, the CMG2093 genotype was the one that suffered the least from the water deficit, presenting the best performances under water restriction conditions and can be considered tolerant to this type of stress.

Key-words: *Oriza sativa* sp. SOD. CAT. APX. Water deficit. Antioxidant.

## 1 INTRODUÇÃO

O arroz é uma cultura que está presente na alimentação de mais de 50% da população mundial (SNEYD, 2016). Segundo a FAO (2019), o Brasil é um dos principais produtores do mundo, sendo o único país não asiático entre as dez maiores produções. O arroz também exerce um papel fundamental no combate a fome, é um alimento rico em energia e nutrientes (SANTOS; RABELO, 2008).

É uma cultura com grande potencial no país, sobretudo ao se analisar o arroz de terras altas, que no Brasil é pouco explorado em vista da enorme área apta a receber seu cultivo. Segundo a CONAB (2021), o arroz de sequeiro representa menos de 20% de toda a produção nacional. Contudo, há necessidade de trabalhos que envolvam a exploração de variedades mais adaptadas a região do cerrado, pois, o arroz é uma cultura que tem grande necessidade de absorção de água, e as regiões que se encontram os maiores campos de cultivo do arroz de sequeiro possuem como característica períodos de estiagem, o que faz esta cultura apresentar baixa produtividade em relação ao seu cultivo irrigado.

O arroz é uma cultura muito sensível à seca principalmente nos períodos de floração e enchimento dos grãos, os danos causados nessas fases podem ser irreversíveis causando enormes perdas na produção. As sementes também são bastante afetadas pelo estresse hídrico, tanto na sua formação, quanto no início do desenvolvimento da cultura, campos com incidência de seca produzem sementes com menor qualidade e em menor quantidade, pois a falta de água tem efeito direto no acúmulo de reserva e no processo de polinização (TAIZ; ZEIGER, 2013; YU *et al.*, 2015).

Estes danos causados à cultura são decorrentes do aumento da concentração das espécies reativas de oxigênio (EROS) na planta, causando um desequilíbrio nas atividades metabólicas e o chamado estresse oxidativo (SIES; CADENAS, 1985). Estudos mostram que, em um ambiente com déficit hídrico, a planta tende a aumentar a produção de EROs devido as mudanças em seu metabolismo ocasionadas pelos efeitos da falta de água (ASADA, 2006; JALIL; AHMAD; ANSARI, 2017). Contudo, estas substâncias são naturais a todo organismo aeróbico e possuem diversas funções metabólicas (OZTETIK, 2011).

As proteínas do complexo antioxidantes são as responsáveis por manter em equilíbrio e evitar a ação oxidativa dessas EROS, no geral, essas enzimas possuem a capacidade de dismutar e reduzir os radicais livres em produtos não tóxicos as plantas.

Este complexo antioxidante é composto principalmente pelas enzimas superóxido dismutase, catalase e as peroxidases. A SOD é a primeira via de defesa contra as EROs, ela

dismuta o radical superóxido em peróxido de hidrogênio, que é uma molécula menos tóxica às células (MITTLER, 2002). As CAT são as principais responsáveis por neutralizar o peróxido de hidrogênio quando este se encontram em excesso nos compartimentos celulares (SHARMA *et al.*, 2012). As APX são as enzimas mais eficientes na limpeza da intoxicação das EROs, elas possuem alta afinidade pelas moléculas e se encontram em diversos compartimentos celulares (WANG; ZHANG; ALLEN, 1999). Muitos estudos relatam a correlação entre as atividades das enzimas antioxidante com a tolerância ao estresse hídrico em plantas de arroz (MELANDRI *et al.*, 2020; NASRIN *et al.*, 2020; YANG *et al.*, 2009).

Com isso, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a atividade e expressão das enzimas do complexo antioxidante com relação a resposta à indução de estresse hídrico na fase reprodutiva, em genótipos de arroz de terras altas.



## 2 MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram conduzidas no Laboratório Central de Pesquisa em Sementes (LCPS) do Departamento de Agricultura da Universidade Federal de Lavras – MG. Foram utilizadas sementes do programa de melhoramento de arroz de terras altas do convênio entre a Universidade Federal de Lavras, EPAMIG e EMBRAPA Arroz e feijão. As sementes utilizadas foram produzidas na safra 2018/19 na cidade de Porangatu – GO.

Dentre as linhagens trabalhadas foram selecionados três genótipos, sendo a BRSMG Relâmpago caracterizada como tolerante ao déficit hídrico e usada como testemunha (CASTRO *et al.*, 2014) e as linhagens CMG2172 e CMG 2093.

Logo após o recebimento das sementes, foi realizado o teor de água médio dos genótipos seguindo a metodologia sugerida na Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). Foi utilizada duplicata dos genótipos, o qual cada amostra continha 25 sementes, em seguida colocadas em estufa com circulação forçada de ar a 105 °C por 24h.

Para a o teste de emergência foram semeadas quatro repetições de 25 sementes em bandejas de acrílico com substrato solo + areia na proporção 2:1 e umedecidos em duas condições de restrição de água, a 10% e 70% da capacidade de campo. As bandejas foram mantidas em câmara de crescimento vegetal à temperatura constante de 25 °C e irrigadas diariamente para a manutenção da capacidade de retenção de água estabelecida através da diferença de peso das bandejas a cada 24h.

A leitura foi feita ao décimo quarto dia após a semeadura, sendo computadas as plântulas que tiveram o hipocótilo totalmente fora do substrato. Os resultados foram expressos em porcentagem para a definição do valor de emergência. O índice de velocidade de emergência foi feito concomitantemente ao teste de emergência, foram contadas diariamente as plântulas que apresentaram o hipocótilo fora do substrato, segundo Maguire (1962).

Para as análises bioquímicas utilizou-se sementes secadas de arroz e plântulas provenientes do teste de emergência, com capacidade de campo de 70 e 10%. Estas foram armazenadas em deep-freezer (-80 °C), até o momento da realização das análises, cujas metodologias estão descritas a seguir.

Foi realizada a análise das enzimas superóxido dismutase (EC 1.15.1.1), catalase (E.C. 1.11.1.6) e peroxidase (EC. 1.11.1.7) por meio da técnica de eletroforese.

A extração das enzimas foi realizada com o tampão Tris HCL 0,2M pH 8,0 + (0,1% de mercaptoetanol), na proporção de 250µL por 100mg de sementes. O material foi homogeneizado em vortex e mantido por 12 horas, em geladeira, seguido de centrifugação a

14.000 rpm por 30 minutos, a 4 °C. A corrida eletroforética foi realizada em sistema de géis de poliacrilamida descontínuo a 7,5% (gel separador) e 4,5% (gel concentrador). O sistema gel/eletrodo utilizado foi o Tris-glicina pH 8,9. Foram aplicados 60 µL do sobrenadante das amostras no gel e a corrida eletroforética foi efetuada a 120 V por 5 horas sob refrigeração (4 °C). Terminada a corrida, os géis foram revelados conforme Alfenas *et al.* (2006), com modificações. Para cada enzima foram analisados três géis, representando as três repetições biológicas. Cada repetição biológica foi utilizada para a avaliação visual da intensidade das bandas e também a quantificação com o auxílio do software ImageJ<sup>®</sup>, na unidade de mm<sup>2</sup>.

A determinação das proteínas totais foi realizada utilizando-se o método da ligação ao corante Coomassie Brilliant Blue (BRADFORD, 1976), utilizando albumina sérica bovina (BSA) como padrão e comprimento de onda de 595 nm. Alíquotas do sobrenadante foram adicionadas a 1 mL de reagente de Bradford, agitado em vórtex para reagir por 15 minutos.

A avaliação da peroxidação lipídica foi realizada mediante a quantificação do malondialdeído (MDA), que é produzido pela reação de ácido tiobarbitúrico (TBA) com pequena modificação do método de Dhindsa *et al.* (1981). Uma amostra de 200 mg foi triturada e homogeneizada em 1,25 ml de ácido tricloroacético (TCA) (0,1%) e duodecil sulfato de sódio (SDS) (1%). O homogeneizado foi centrifugado a 12.000g durante 15 min. Para uma alíquota 300 µL do sobrenadante foram adicionados 1 mL de ácido tricloroacético 20% (TCA) a um recipiente contendo 0,5% de ácido tiobarbitúrico TBA. A mistura foi aquecida a 95 °C durante 30 minutos e depois rapidamente esfriada em um banho de gelo. Posteriormente, foi feita a leitura de absorvância a 532 nm e a concentração do MDA calculada utilizando o coeficiente de extinção de 155 mM<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> (BUEGE *et al.*, 1978).

Para a extração das enzimas do metabolismo antioxidante, 200 mg do material foram macerados em nitrogênio líquido e homogeneizados em 1,5 mL do tampão de extração. Os homogeneizados foram centrifugados a 12.000 g, por 30 minutos, a 4 °C, coletando-se os sobrenadantes para as análises enzimáticas conforme apresentado por Biemelt, Keetman e Albrecht (1998).

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

nm em espectrofotômetro.

A atividade da catalase (CAT) foi determinada pelo decréscimo na absorbância a 240 nm, a cada 15 segundos, por 3 minutos, monitorado pelo consumo de peróxido de hidrogênio (HAVIR; MCHALE, 1987). A reação foi iniciada pela adição do  $\text{H}_2\text{O}_2$  ( $\epsilon = 36 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). Uma unidade de CAT é definida pela quantidade de enzima necessária para decompor  $1 \mu\text{mol min}^{-1}$  de  $\text{H}_2\text{O}_2$ .

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

Para os testes de emergência e IVE foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial (3x2), sendo três linhagens e duas condições de campo para produção de sementes (com e sem irrigação). Os resultados foram submetidos à análise de variância, utilizando o Teste F, e a comparação das médias dos tratamentos foi feita por meio do software SISVAR, utilizando o teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Para comparação dos testes bioquímicos foi utilizados o desvio padrão da média.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os genótipos selecionados para serem utilizados nas análises moleculares, foram submetidos aos testes de emergência e índice de velocidade de emergência (IVE) em ambientes simulando uma condição ótima de semeadura, com 70% da capacidade de campo, e uma condição de restrição hídrica com 10% da capacidade de campo.

Para o teste de emergência (TABELA 1) é visto um padrão nos resultados, independente das condições impostas, todos os resultados mostraram que o genótipo CMG2093 foi superior ao genótipo CMG2172 e não diferindo estatisticamente da testemunha Relâmpago. Assim, o genótipo CMG2093, além de apresentar sementes mais vigorosas foi capaz de se desenvolver melhor na condição de deficit hídrico.

Os resultados observados para o índice de velocidade de emergência foram semelhantes aos da emergência somente na condição a 70% da capacidade de retenção de água do solo, mostrando que, em condições ideais, o genótipo CMG2093 é superior ao genótipo CMG2172, não diferindo estatisticamente da testemunha nos dois ambientes de produção das sementes, com e sem irrigação. Contudo, em condição de restrição hídrica, 10% da capacidade de campo, as linhagens CMG2093 e CMG2172 não apresentaram diferença estatística independente do ambiente de produção das sementes, sendo a testemunha superior ao genótipo CMG2172 somente em sementes produzidas em campos irrigados.

Estes resultados corroboram com as outras análises feitas anteriormente e ressalta a diferença entre os genótipos contrastantes CMG2093 e CMG2172, pois como já se sabe, sementes vigorosas tendem a apresentar melhor crescimento e desenvolvimento, pois, estes genótipos conseguem maior transferência das reservas para o seu eixo embrionário (NAKAGAWA, 1999; MARCOS FILHO, 2015). Segundo Guedes *et al.* (2011), a utilização dos testes de emergência e IVE é um bom indicativo para inferência de vigor de sementes por conta que eles simulam as condições do campo.

Tabela 1 - Emergência (%) e Índice de Velocidade de Emergência (IVE) em sementes de arroz produzidas com duas condições de campo, com e sem irrigação, de três genótipos genéticos diferentes submetidos à capacidade de campo de 70 e 10%.

Emergência de plântulas (%)					
Cultivares	Capacidade de campo				Média
	70		10		
	C/ irrigação	S/ irrigação	C/ irrigação	S/ irrigação	
CMG2172	72 Ba	70 Ba	65 Ba	67 Ba	69 B
BRSMG Relampago	91 ABa	82 ABb	96 Aa	82 ABb	88 A
CMG2093	93 Aa	93 Aa	85 Aa	97 Aa	92 A
Média	84 a		82 a		
CV (%)	13,72				
IVE					
Cultivares	Capacidade de campo				Média
	70		10		
	C/ irrigação	S/ irrigação	C/ irrigação	S/ irrigação	
CMG2172	3,138 Ba	2,992 Ba	1,262 Ba	1,357 Aa	2,19 B
BRSMG Relampago	3,887 Aa	3,392 ABa	2,050 Aa	1,580 Aa	2,73 A
CMG2093	4,138 Aa	4,053 Aa	1,767 ABa	1,950 Aa	2,98 A
Média	3,600 a		1,661 b		
CV (%)	15,46				

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si, pelo teste de Tukey, aos 5% de probabilidade.

Fonte: Do autor (2021).

A tolerância ao déficit hídrico é composta por diversos fatores, e a capacidade de desintoxicação das espécies reativas de oxigênio é uma delas, no geral, o complexo antioxidante tem como função proteger as células dos danos oxidativos causados por estes radicais (SOARES *et al.*, 2019; YOU; CHAN, 2015), que em condição de seca são intensamente produzidos devido a redução da concentração de CO<sub>2</sub> (HASANUZZAMAN *et al.*, 2020). A capacidade de formação de sementes mais vigorosas está diretamente ligada à capacidade de expressão das enzimas do complexo antioxidante (ZHU *et al.*, 2020).

Com isso, a realização das análises de quantificação enzimática é necessária para mensurar a capacidade das plantas em responder as interações do ambiente. Os resultados observados para proteínas totais mostram uma maior concentração nas sementes do que nas plântulas oriundas das mesmas, isto ocorre, pois, sementes possuem baixo teor de água em comparação com as plântulas. Ao analisar somente as sementes, independente da condição do campo de produção, é visto resultado superior da linhagem CMG2172, em comparação com os demais genótipos, isto mostra que mesmo sendo a mesma cultura há uma variedade nas respostas ao acúmulo de proteínas.

Comparando-se estes resultados com os encontrados para os testes de vigor é visto que as sementes com menor qualidade tiveram uma produção de proteínas superior, assim, devido a maior deterioração, estas sementes tiveram uma maior necessidade de produção de proteínas a fim de mitigar os efeitos danosos.

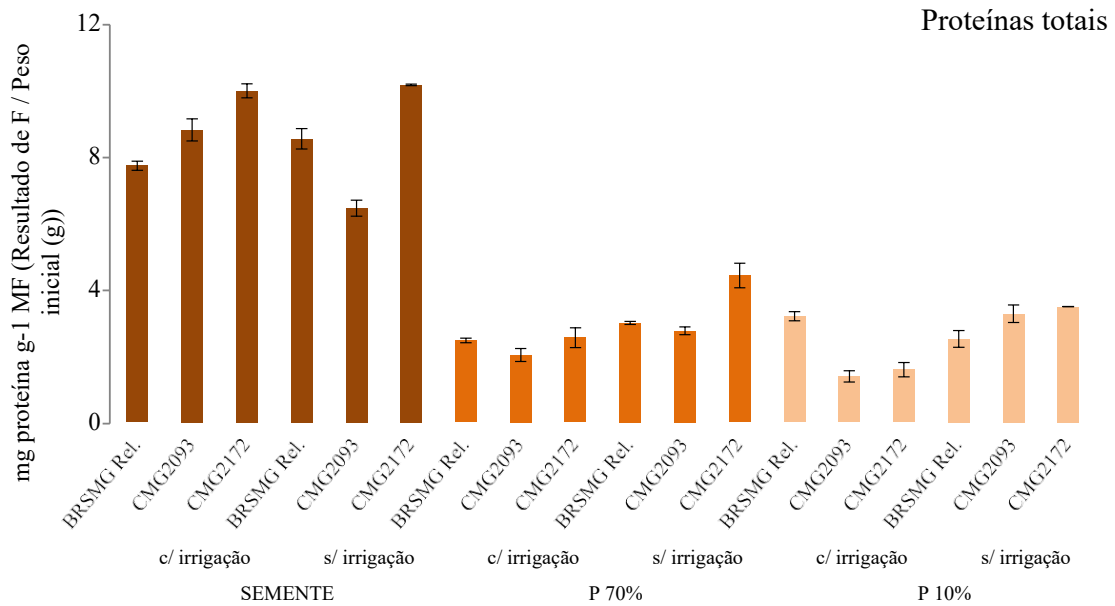
Para as plântulas produzidas a 70% da capacidade de campo, houve diferença entre as linhagens apenas ao analisar aquelas provenientes dos campos de produção de sementes sem irrigação, ao qual a linhagem CMG2172 obteve resultado superior em comparação às demais. Ao analisar estes resultados com os testes de vigor é visto que esta maior concentração de proteínas na linhagem CMG2172 pode estar relacionada a uma maior deterioração desse material desde a sua formação o que resultaria numa intensa produção de compostos solúveis.

Para as linhagens CMG2172 e CMG2093 observou-se aumento na concentração de proteínas em plântulas produzidas a 10% da capacidade de retenção de água oriundas das sementes provenientes dos campos sem controle da irrigação, isto mostra que estes genótipos sentiram a indução ao estresse fazendo-os aumentar a produção de substâncias a fim de reverter os danos provenientes da falta de água. A Relâmpago, apresentou queda entre as duas condições de campo, sendo superior às demais linhagens quando analisado o ambiente de produção controlado por irrigação.

Estas diferentes concentrações quanto ao ambiente de semeadura também foram verificada por Sharma e Dubey (2005), e os mesmos entenderam que a concentração de

proteínas solúveis varia de acordo com o genótipo da cultura, tempo de incidência e intensidade do estresse.

Figura 1 - Quantificação de proteínas totais em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



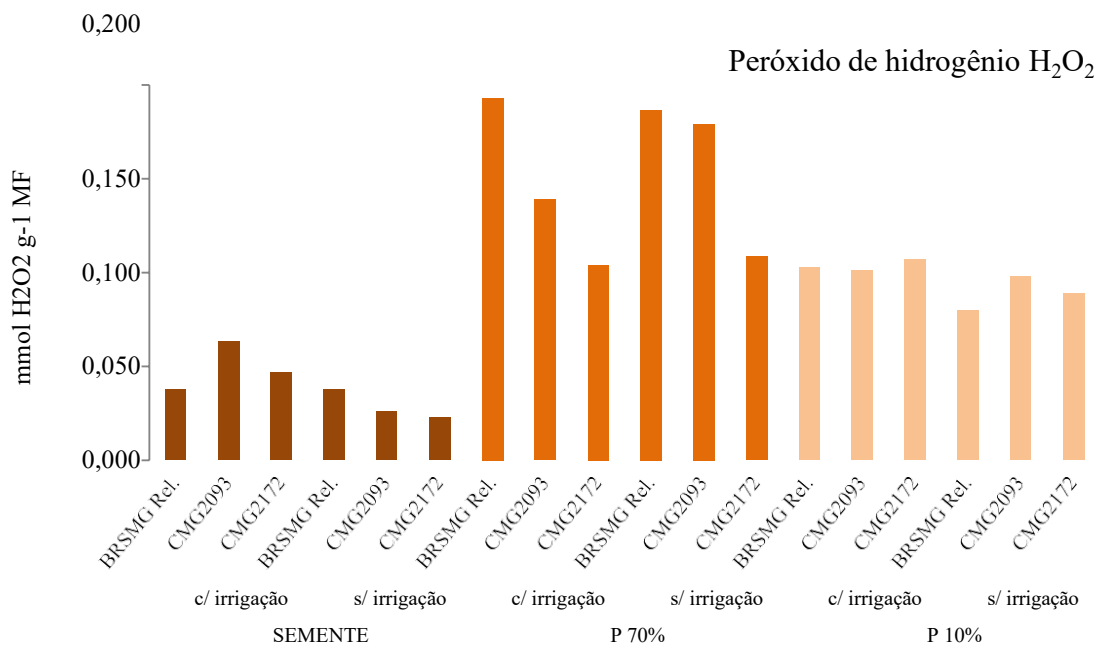
Fonte: Do autor (2021).

Em condições de estresse hídrico a quantidade de  $H_2O_2$  pode ser aumentada, o que pode causar maiores danos a níveis celulares. O MDA é o último produto oriundo da peroxidação lipídica, assim, muitos utilizam sua mensuração a fim de estabelecer um parâmetro para o estresse oxidativo, pois o excesso de EROs tem como sintoma a peroxidação lipídica (KHOUBNASABJAFARI *et al.*, 2015; NAEEM *et al.*, 2018).

Com isso, o  $H_2O_2$  e a MDA (FIGURAS 2 e 3) são analisados a fim de se mensurar o quanto a incidência do estresse foi capaz de produzir danos a níveis de membrana, contudo, estas análises podem não estar correlacionadas entre si, como é visto neste trabalho na condição de maior incidência do estresse, pois mesmo contendo quantidade equilibrada de peróxido de hidrogênio para todas linhagens, a linhagem CMG2172 apresentou maior MDA. Zhan *et al.* (2019) encontraram estes mesmos resultados para sementes de tabaco, e atribuíram maiores valores de MDA a mais fatores do que somente o acúmulo de  $H_2O_2$ , como no caso a maior expressão da enzima lipoxigenase LOX.

O melhor desempenho do genótipo CMG2093 na condição de 70% da capacidade de campo nos testes de vigor diante do alto nível de peróxido de hidrogênio, comparado à linhagem CMG2172, sugere que neste material a função sinalizadora dos radicais livres foi eficiente. Altos níveis de  $H_2O_2$  também têm sido correlacionados à maior porcentagem de germinação e vigor de sementes, como visto neste trabalho (SAHU *et al.*, 2017). Resultado semelhante foi apresentado por Haplerin e Lynch (2003) em arábopsis em condição de déficit hídrico, ao qual as plantas com menor crescimento e desenvolvimento foram as que apresentaram mudanças na permeabilidade da parede celular devido ao aumento do MDA produzido. Destaca-se que o acúmulo de  $H_2O_2$  não ocorre apenas em situações de estresse, mas também durante o metabolismo normal das plantas.

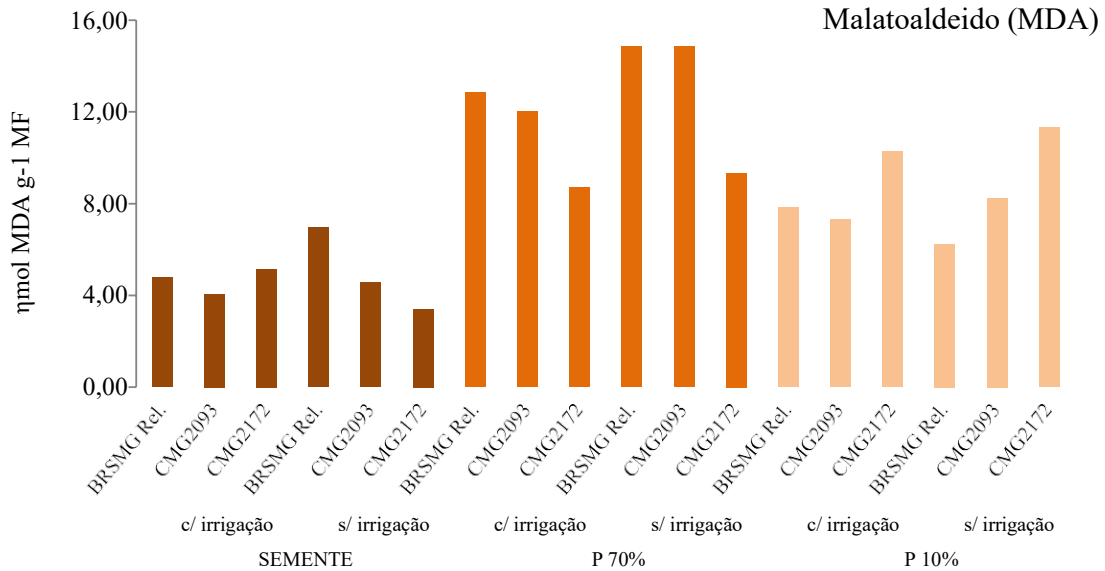
Figura 2 - Quantificação de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).



Figura 3 - Quantificação de malondialdeído (MDA) em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).

Com relação à atividade da SOD (Figura 4), é visto que as sementes foram os genótipos com as menores concentrações da enzima sendo a linhagem CMG2172 o genótipo com os menores valores para as duas condições de produção de sementes no campo.

Em condições ideais de cultivo como a 70% da capacidade de campo as plântulas produzidas tiveram resultados semelhantes tanto para as sementes oriundas dos campos irrigados ou não. A linhagem CMG2093 apresentou atividade superior nos dois comparativos em relação ao material contrastante. Comparando-se os ambientes é notada uma queda na atividade em todas as linhagens, com isso é visto que sementes oriundas dos campos sem irrigação desenvolvem plântulas com menor atividade da enzima SOD. Já para as plântulas produzidas a 10% da capacidade de campo na condição de ambiente com irrigação as linhagens CMG2172 e CMG2093 foram superiores a testemunha, e que em ambiente sem irrigação obteve a testemunha e o genótipo CMG2093 com as maiores concentrações. Um fator interessante ao avaliar os resultados desta situação é a grande diferença entre as condições de produção dessas sementes, mostrando que plantas em condições extremas tendem a produzir menos a enzima superóxido dismutase.

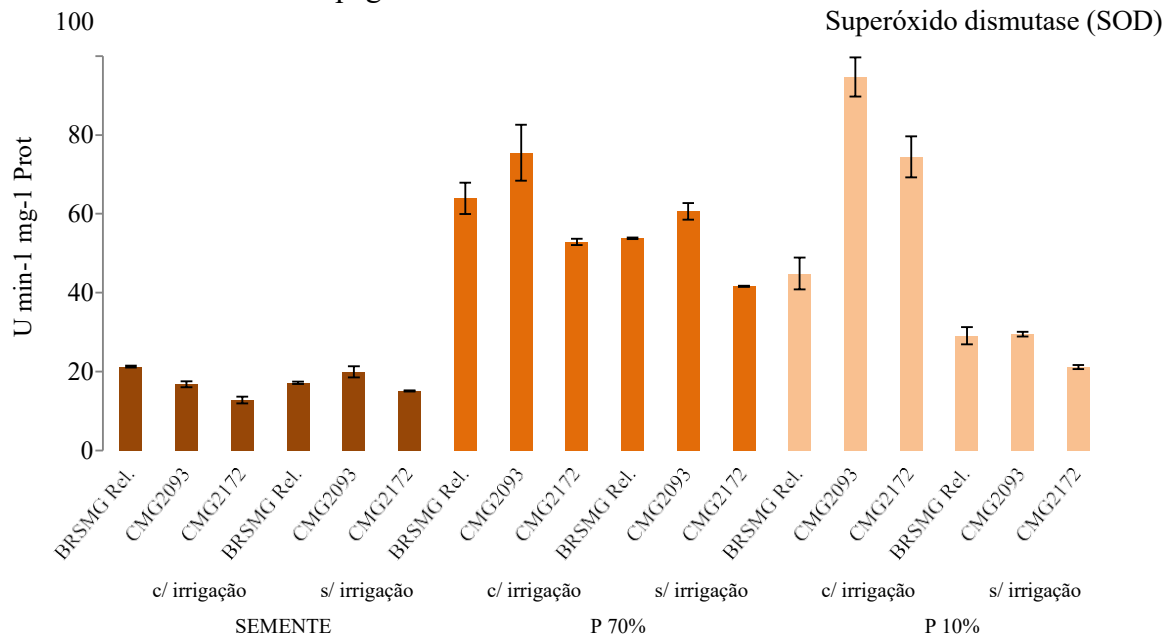
Assim, é observada uma relação entre a atividade da enzima SOD com a capacidade dos genótipos em se desenvolver e estabelecer em condição de falta de água, visto que nos testes de vigor o material que obteve as melhores médias para emergência

e IVE apresentou a maior atividade da enzima superóxido dismutase tanto em condições ideais quanto na de restrição hídrica.

Plantas com maior atividade de SOD possuem maior proteção celular (MULLINEAUX E RAUSCH, 2005), pois, esta enzima é a primeira via de combate aos efeitos danosos do acúmulo de radicais livres nas células, ela possui a função de iniciar o processo de desintoxicação por meio da redução do radical superóxido em peróxido de hidrogênio (DAS E ROYCHOUDHURY, 2014).

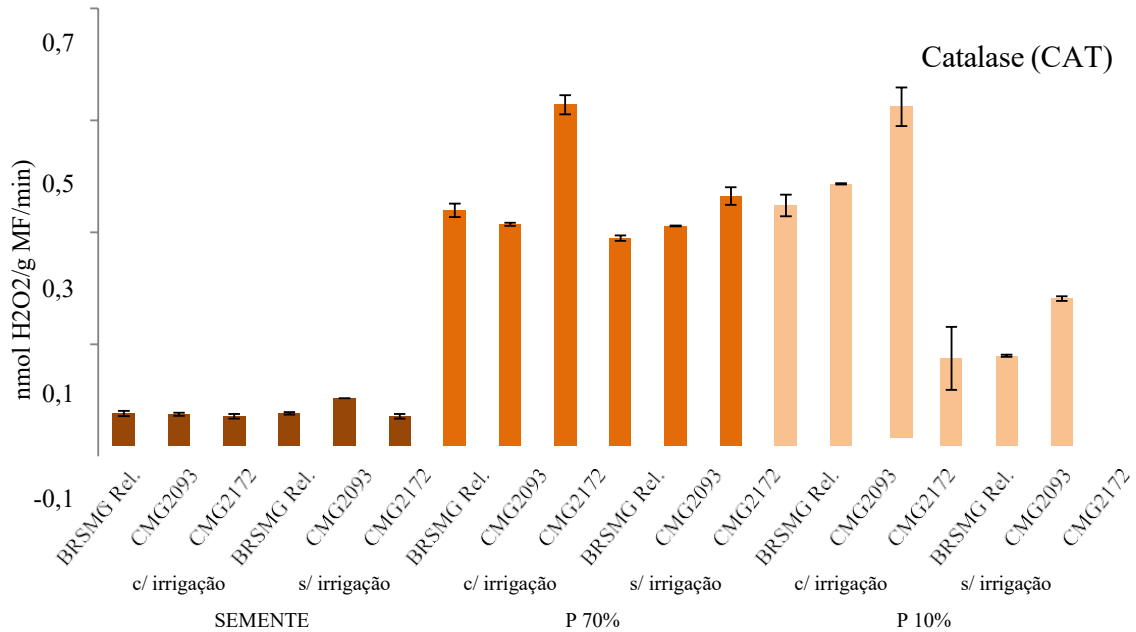
Com isso, a atividade aumentada da SOD em plantas em condições de déficit hídrico mostra-se um sinal positivo quanto à capacidade da planta em tolerar adversidades ambientais, pois, baixos níveis de radical superóxido causam menos danos oxidativos às células, devido a sua menor toxidez comparada ao peróxido de hidrogênio (LI et al., 2013). Os resultados deste trabalho corroboram com os encontrados por Singh et al. (2020), que observaram maior desenvolvimento e crescimento nas plântulas de arroz que apresentaram maior atividade da SOD.

Figura 4 - Quantificação de superóxido dismutase (SOD) em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 5 - Quantificação de Catalase (CAT) em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).

Nos três genótipos analisados é visto que os genótipos trabalhados apresentam equilíbrio na atividade da ascorbato peroxidase (FIGURA 6) na condição de produção em campos irrigados, o que mostra que, em condições ideais de formação, as sementes dessas linhagem apresentam a mesma resposta quanto a produção de APX.

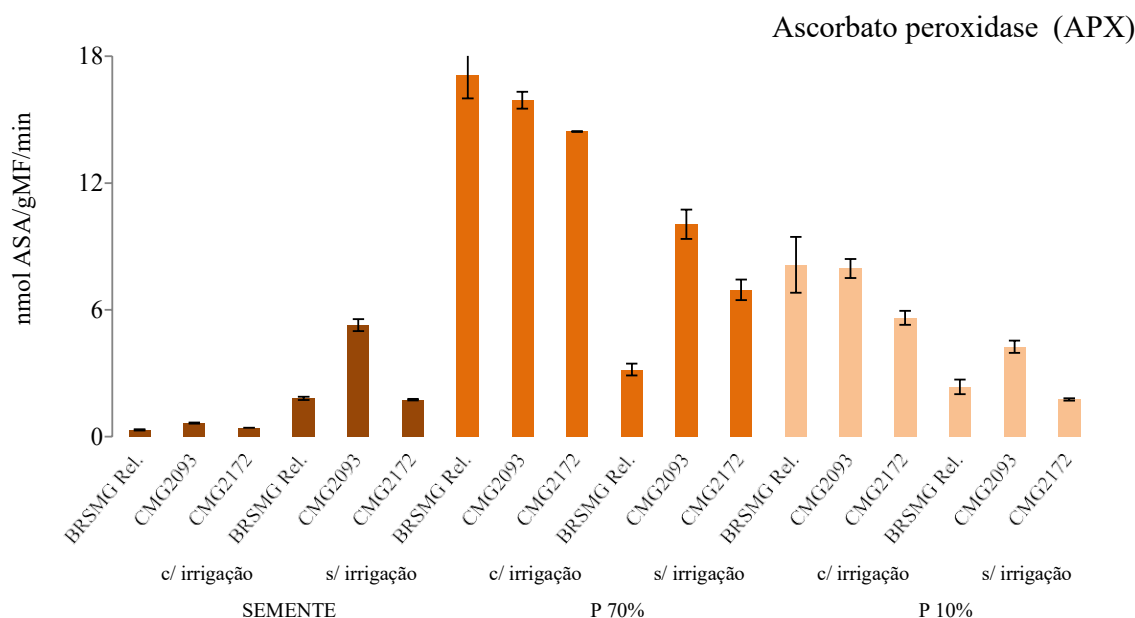
Quando analisados os genótipos oriundos dos campos de produção, sem irrigação, ou seja, onde houve incidência de estresse, é visto que a linhagem CMG2093 apresentou a maior atividade em comparação com os demais, independente do material avaliado.

Este resultado corrobora com os encontrados na avaliação da CAT, pois, a maior presença da APX foi suficiente para dismutar o peróxido de hidrogênio produzido, o que resultou em menor atividade da CAT nestes genótipos, a APX possui um papel de desintoxicação, ou seja, ela evita o acúmulo de peróxido de hidrogênio no sistema (SINGH et al., 2020). Sohag *et al.* (2020) encontraram que as plântulas de arroz submetidas ao déficit hídrico que tiveram alta atividade da APX apresentaram maior tolerância ao estresse hídrico induzido.

Esta maior atividade da APX nas plântulas, também sugere um sinal de tolerância ao déficit hídrico, pois, além de diminuir o acúmulo de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a sua presença em diferentes

compartimentos celulares cria uma barreira de defesa ao estresse oxidativo em organelas fundamentais como o cloroplasto (ZHANG *et al.*, 2013).

Figura 6 - Quantificação de ascorbato peroxidase (APX) em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).

Enzimas do complexo antioxidante são extremamente importantes para o controle dos radicais livres produzidos naturalmente nos seres vivos, e tornam-se ainda mais relevantes em condições ambientais extremas, pois, possuem a capacidade de desintoxicar o excesso de EROs produzidos nas plantas (JALEEL *et al.*, 2009). Assim, analisar o quanto as enzimas estão atuando no momento da incidência do estresse torna-se uma importante ferramenta para se entender as diferentes reações que cada genótipo apresenta naquela situação.

A catalase é a principal enzima responsável por desintoxicar o excesso de peróxido de hidrogênio produzido nas células e estão presentes principalmente no peroxissoma, elas são encontradas em diferentes isoformas e possuem como função transformar o  $H_2O_2$  em água e  $O_2$  molecular (SHARMA *et al.*, 2012).

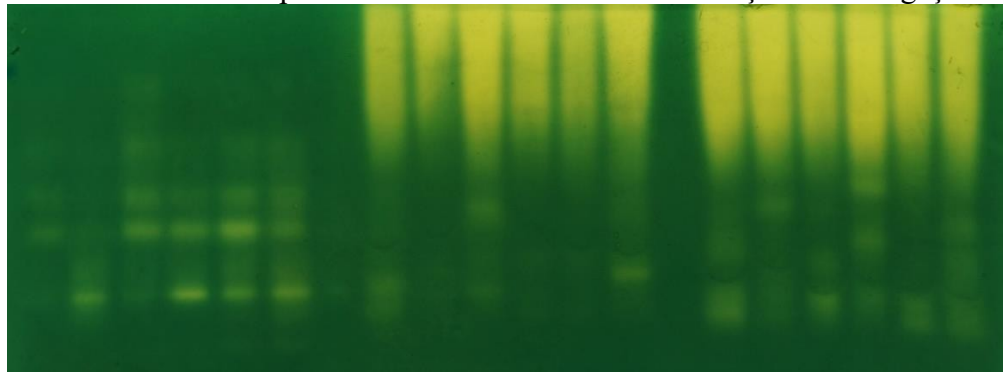
Com isso, ao observar os resultados obtidos pelos genótipos para catalase (FIGURAS 7 e 8), nota-se um equilíbrio nas sementes secas para os campos de produção com irrigação e sem irrigação, mostrando que na formação das sementes a indução ao estresse foi insuficiente para ocasionar uma diferença na composição destes genótipos. Isto se comprova ao analisar a plântulas obtidas do teste de emergência a 70% da capacidade do campo, que apresentou um padrão de resposta entre os genótipos dos dois ambientes de produção, sendo a maior expressão para a linhagem CMG2172 e a menor para a linhagem CMG2093. Por terem sido semeadas em uma condição ideal de humidade, esta diferença entre estes dois genótipos

quanto à expressão da CAT pode ser atribuída a menor qualidade fisiológica do genótipo CMG2172, visto que nos testes de vigor mostraram baixo desempenho comparado aos outros genótipos, ou seja, provavelmente estas sementes estão em processo deteriorativo mais intenso, o que resultou na produção de mais EROs e, com isso, o aumento da atividade da CAT naquele momento.

Em relação à expressão da CAT nas plântulas do teste de emergência em 10% da capacidade de campo, observa-se um aumento significativo da expressão da enzima nos genótipos CMG2093 e na testemunha em comparação com as suas plântulas na condição de semeadura com umidade controlada (70% da capacidade de campo), enquanto a linhagem CMG2172 não mostrou diferença, apresentando o mesmo padrão de expressão nas duas condições de semeadura. Este aumento em condição de déficit hídrico, principalmente na linhagem CMG2093, pode ser visto como um sinal positivo, pois, neste momento, devido as alterações no metabolismo celular, a fim de se adaptar a uma condição de seca, a atividade da CAT torna-se necessária para evitar os danos oxidativos provenientes do acúmulo de EROs, e comparando aos testes de emergência e IVE nota-se que na condição de 10% da capacidade de campo a linhagem CMG2093 foi superior a linhagem CMG2172, o que reforça a teoria que este aumento foi suficiente para manter a qualidade destes genótipos, ressaltando que na condição de restrição hídrica houve queda na produção de MDA para as linhagens CMG2093 e Relâmpago e aumento para no genótipo CMG2093.

A catalase é uma enzima intracelular e por dismutação transforma o  $H_2O_2$  em uma substância não reativa, o que a torna essencial para a diminuição dos danos provenientes do estresse oxidativo (MARQUES *et al.*, 2019). O aumento da expressão da CAT em sementes mais vigorosas pode indicar melhor funcionamento do sistema antioxidante na prevenção de danos na retomada do metabolismo da germinação (DUCATTI, 2018). Outras culturas também apresentam este incremento da enzima catalase em condição de restrição hídrica induzida, como o observado por Hendges *et al.* (2015) em milho, Bortolin *et al.* (2020) em grama forquilha e Lima (2016) para cártamo.

Figura 7 - Padrão isoenzimático de catalase (CAT) em sementes produzidas com e sem estresse hídrico e plântulas submetidas a duas condições de irrigação de *Oriza sativa* sp.

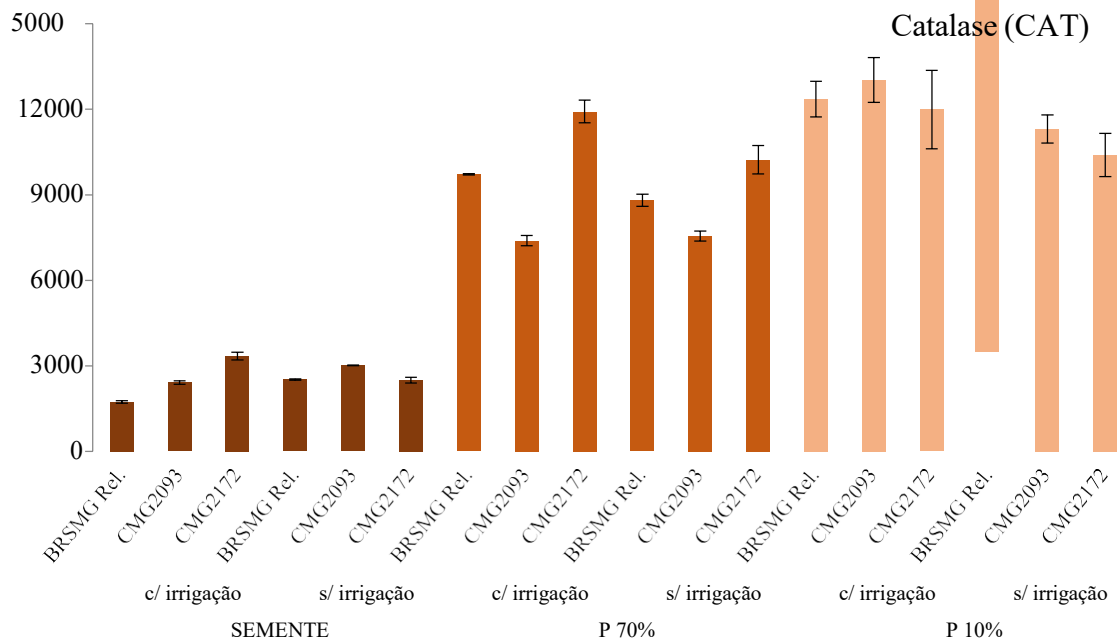


*sativa* sp.

Fonte: Do autor (2021).

Figura 8 - Expressão da enzima Catalase (CAT) em sementes de arroz, produzidas com e sem

irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).

As peroxidases são fundamentais para o controle da intoxicação das EROs, além de possuírem maior afinidade pelo  $H_2O_2$ , elas estão amplamente distribuídas nas células (WANG; ZHANG; ALLEN, 1999). Não foi possível detectar a presença destas enzimas nas sementes secas (FIGURAS 9 e 10), outros trabalhos relatam que não puderam quantificar a atividade da peroxidase em sementes de arroz por meio da técnica de eletroforese, pois sua

expressão varia de acordo com o tipo de tecido e estágio de desenvolvimento, sendo sua presença observada de acordo com o crescimento vegetal (VIEIRA *et al.*, 2008; TUNES *et al.*, 2014).

Com relação às plântulas produzidas a 70% da capacidade de campo, nota-se maior expressão para os dois campos de produção de sementes para o genótipo CMG2172, o mesmo observado para a enzima CAT. Levando-se em consideração os resultados obtidos na emergência e IVE, esta diferença entre os genótipos quanto à expressão da enzima peroxidase, pode ser justificada devido à baixa qualidade fisiológica da linhagem CMG2172 que resultou numa maior expressão dessa enzima com a finalidade de se mitigar os danos causados pelas EROs.

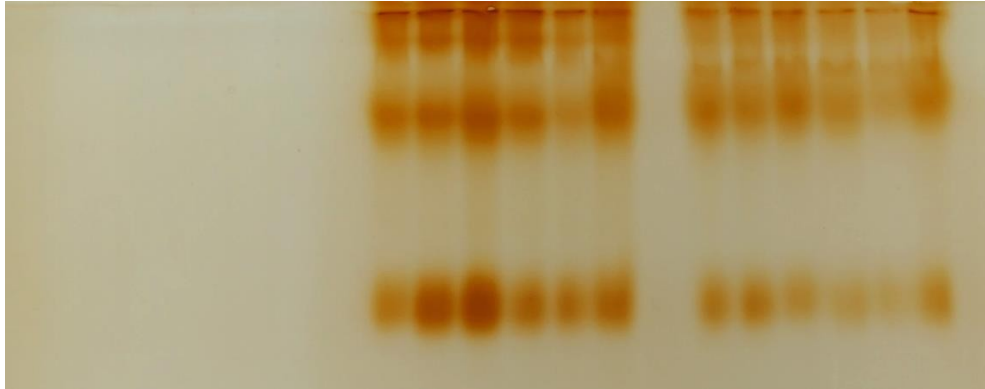
Já as plântulas do teste de emergência a 10% da capacidade de campo não tiveram diferença entre as sementes oriundas do campo de produção com irrigação. Porém, para as plântulas oriundas das sementes dos campos sem irrigação, é visto que a linhagem CMG2172 obteve maior expressão, este resultado corrobora com o observado para a SOD deste mesmo material. Com isso, pode ser dito que a linhagem CMG2172 foi a mais sensível as diferentes incidências de estresse, tanto na produção da semente quanto na germinação em um ambiente com restrição hídrica. Por serem as enzimas com a maior afinidade pelo peróxido de hidrogênio, as peroxidases possuem um papel fundamental para a desintoxicação precoce proveniente do acúmulo deste radical, com isso, a linhagem CMG2172 apresentando menor qualidade fisiológica diante dos testes de emergência e IVE, a maior produção das peroxidases foi em resposta ao maior dano a níveis de membrana observado pelo quantificação do MDA nesta condição.

D'Arcy-Lameta *et al.* (2006) também encontraram esta relação para feijão-caupi, ao qual, genótipos sensíveis ao estresse hídrico tiveram maior transcrição dos genes da APX a fim de contornar os efeitos da restrição hídrica. O mesmo foi observado para plântulas de centeio sob efeito da restrição hídrica (PEDÓ *et al.*, 2016), ao qual o aumento da expressão das peroxidases foi relacionado com o baixo vigor das sementes, o que pode ser notado neste trabalho principalmente ao analisar a enzima nas plântulas obtidas a 70% da capacidade de campo.

Relaciona-se a expressão da POX com a capacidade de retenção de água pelas folhas (MERCADO *et al.*, 2004), assim, é justificado sua menor expressão na linhagem CMG2093 visto que das três foi a que apresentou o menor desenvolvimento da parte aérea. Resultado semelhante foi observado por Zhu *et al.* (2020) em plântulas de mandioca sob diferentes condições hídricas, foi observado que as plântulas com as menores quedas da atividade da

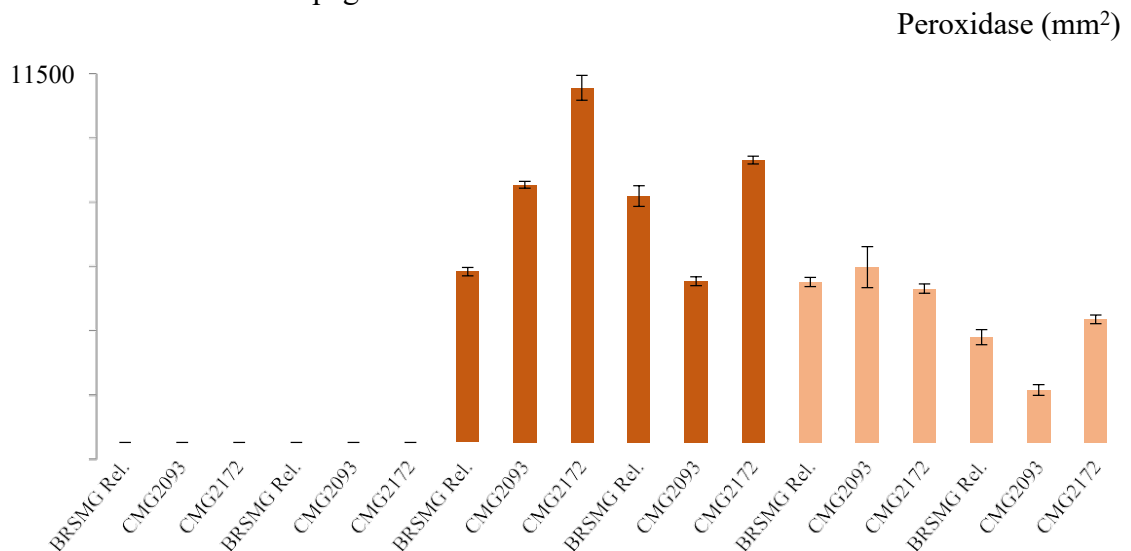
POX foram as plântulas que tiveram a menor perda de água na parte aérea.

Figura 8 - Padrão isoenzimático de peroxidase (POX) em sementes produzidas com e sem estresse hídrico e plântulas submetidas a duas condições de irrigação de *Oriza sativa* sp.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 9 - Expressão da enzima Peroxidase (POX) em sementes de arroz, produzidas com e sem irrigação e de plântulas provenientes destes sistemas de produção em condições de 70 e 10% de capacidade de campo, para as cultivares CMG2172, BRSMG Relampago e CMG2093.



Fonte: Do autor (2021).

Ao analisar a expressão da CAT e das peroxidases dos genótipos nas duas condições do teste de emergência em conjunto com a quantificação do peróxido de hidrogênio e MDA, é visto que a queda na expressão das peroxidases na condição de deficit hídrico resultou em um aumento da expressão da CAT nos genótipos que apresentaram melhores resultados para os testes de vigor, no caso a linhagem CMG2093 e a Relâmpago, e que, este aumento foi



suficiente para diminuir a concentração de  $H_2O_2$  e os danos a nível de membrana, o que não foi visto para a linhagem CMG2172 que manteve a concentração de peróxido e aumentou a produção de MDA na condição de 10% da capacidade de campo. O mesmo foi encontrado por Wang *et al.* (2018), os quais observaram que sementes com maior deterioração foram as mesmas que apresentaram maior peroxidação lipídica por conta da menor eficiência das enzimas do complexo antioxidante.

Esta realação entre a alta na expressão da CAT e queda na produção de MDA, foi vista por Refli e Purwestri (2016) em arroz sob deficit hídrico, a qual os autores relatam que alta expressão dessa enzima e menor peroxidação lipídica é devido ao local de origem da CAT ser o peroxissoma e que a relação inversa entre a CAT e POX é natural.

#### **4 CONCLUSÃO**

O genótipo CMG2093 foi o que menos sofreu com o déficit hídrico, apresentando os melhores desempenhos sob condição de restrição hídrica, podendo ser considerado tolerante a este tipo de estresse. Ressalta-se ainda, que o estresse hídrico influencia a expressão enzimática, e cada genótipo pode reagir ao estresse de diferentes formas e com diferentes mecanismos de defesa.

## REFERÊNCIAS

- ALFENAS, A. **Eletroforese e marcadores bioquímicos em plantas e microrganismos**. 2. ed. Viçosa: UFV, 627 p. il, 2006.
- 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**, [s.l.], v. 116, n. 2, p. 651-658, 1998.
- BORTOLIN, G.S. *et al.* Seed germination and antioxidant enzyme activity in seedlings of diploid and tetraploid bahiagrass under water restriction. **Ciência Rural**, [s.l.], v. 50, 2020.
- BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. **Analytical Biochemistry**, [s.l.], v. 72, n. 1-2, p. 248-254, 1976.
- BRASIL. MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009.
- BUEGE, J.A.; AUST, S.D. Microsomal lipid peroxidation. **Methods in Enzymology**, [s.l.], v. 52, p. 302-310, 1978.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: grãos**, v. 8, safra 2020/21, n. 12, décimo levantamento, julho. 2021. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 20 jul. 2021.
- D'ARCY-LAMETA, A. *et al.* Isolation and characterization of four ascorbate peroxidase cDNAs responsive to water deficit in cowpea leaves. **Annals of Botany**, [s.l.], v.97, n. 1, p. 133-140, 2006.
- DAS, K.; ROYCHOUDHURY, A. Reactive oxygen species (ROS) and response of antioxidants as ROS-scavengers during environmental stress in plants. **Frontiers in Environmental Science**, [s.l.], v. 2, p. 53, 2014.
- DHINDSA, R. S. *et al.* Leaf senescence: correlated with increased levels of membrane permeability and lipid peroxidation, and decreased levels of superoxide dismutase and catalase. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 32, n. 1, p. 93-101, 1981.
- DUCATTI, K. R. **Vigor de sementes de soja: estudos fisiológicos e moleculares relacionados ao déficit hídrico**. 2018.
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT database: agriculture production**, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/home/en/>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- GIANNOPOLITIS, C. N.; RIES, S. K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higherplants. **Plant physiology**, [s.l.], v. 59, n. 2, p. 309-314, 1977.

GUEDES, R. S. *et al.* Envelhecimento acelerado na avaliação da qualidade fisiológica de sementes de *Dalbergia nigra* (Vell.) Fr. All. **Semina: Ciências Agrárias**, [s.l.], v. 32, n. 2, p. 443-450, 2011.

HALPERIN, S. J.; LYNCH, J. P. Effects of salinity on cytosolic Na<sup>+</sup> and K<sup>+</sup> in root hairs of *Arabidopsis thaliana*: in vivo measurements using the fluorescent dyes SBFI and PBF1. **Journal of Experimental Botany**, [s.l.], v. 54, n. 390, p. 2035-2043, 2003.

HAVIR, E.A.; MCHALE, N. A. Biochemical and developmental characterization of multiple forms of catalase in tobacco leaves. **Plant physiology**, [s.l.], v. 84, n. 2, p. 450-455, 1987.

HENDGES, F. B. *et al.* Avaliação enzimática e fisiológica de plântulas de milho submetidas à seca. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, [s.l.], v. 4, n. 2, p. 52-63, 2015.

JALEEL, C. A. *et al.* Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints. **Acta Physiologia e Plantarum**, [s.l.], v. 31, n. 3, p. 427-436, 2009.

KEHRER, J. P.; ROBERTSON, J. D.; SMITH, C. V. **Free Radicals and Reactive Oxygen Species**. 2010.

LI, C. *et al.* Unravelling mitochondrial retrograde regulation in the abiotic stress induction of rice ALTERNATIVE OXIDASE 1 genes. **Plant, cell & environment**, [s.l.], v. 36, n. 4, p. 775-788, 2013.

LIMA, J. G. S. de. **Influência dos estresses hídrico e salino nos sistemas antioxidante e lipídico durante a transição semente-plântula em cártamo**. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado em Bioquímica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

LIU, B.; SOUNDARARAJAN, P.; MANIVANNAN, A. Mechanisms of silicon-mediated amelioration of salt stress in plants. **Plants**, [s.l.], v. 8, n. 9, p. 307, 2019.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination. Aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor 1. **Crop SCIENCE**, [s.l.], v. 2, n. 2, p. 176-177, 1962.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. 2. ed. Piracicaba: ABRATES, 2015. 659 p.

MARCOS, J.. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, [s.l.], v. 72, p. 363-374, 2015.

MARQUES, E. R. *et al.* Dormancy and enzymatic activity of rice cultivars seeds stored in different environments. **Journal of Seed Science**, [s.l.], v. 36, n. 4, p. 435-442, 2014.

MARQUES, T. L. *et al.* Expression of ZmLEA3, AOX2 and ZmPP2C genes in maize lines associated with tolerance to water deficit. **Ciência e Agrotecnologia**, [s.l.], v. 43, 2019.

MERCADO, J. A. *et al.* Changes in the water binding characteristics of the cell walls from transgenic *Nicotiana tabacum* leaves with enhanced levels of peroxidase activity. **Physiol. Plantarum**, [s.l.], v. 122, p. 504-512, 2004.

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, 2005.

NAKAGAWA, J. Testes de vigor baseados no desempenho das plântulas. *In*: KRZYZANOSKI, F. C.; VIEIRA, R. D.; FRANÇA NETO, J. B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. Cap. 2. p. 2 - 24.

NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts. **Plant and Cell Physiology**, [s.l.], v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981.

NOCTOR, G.; MHAMDI, A.; FOYER, C. H. The roles of reactive oxygen metabolism in drought: not so cut and dried. **Plant physiology**, [s.l.], v. 164, n. 4, p. 1636-1648, 2014.

PEDÓ, T. *et al.* expressão isoenzimática e do vigor de sementes de centeio sob efeito da restrição hídrica. **Pesquisa Agropecuária Pernambucana**, [s.l.], v. 21, n. 1, p. 17-23, 2016.

REFLI; PURWESTRI, Y.A. The response of antioxidant genes in rice (*Oryza sativa* L.) seedling Cv. Cempo Ireng under drought and salinity stresses. *In*: **AIP Conference Proceedings**. AIP Publishing LLC, 2016. p. 020047.

SAHU, B. *et al.* Insights on germinability and desiccation tolerance in developing neemseeds (*Azadirachta indica*): role of AOS, antioxidative enzymes and dehydrin-like protein. **Plant Physiology and Biochemistry**, [s.l.], v. 112, p. 64-73, 2017.

SINGH, D. P. *et al.* Microbial inoculation in rice regulates antioxidative reactions and defense related genes to mitigate drought stress. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 1-17, 2020.

SOARES, C. *et al.* Plants facing oxidative challenges. A little help from the antioxidant networks. **Environmental and Experimental Botany**, [s.l.], v. 161, p. 4-25, 2019.

SOHAG, A. AL, M. *et al.* Exogenous salicylic acid and hydrogen peroxide attenuated drought stress in rice. **Plant, Soil and Environment**, [s.l.], v. 66, n. 1, p. 7-13, 2020.

SOSBAI. Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil/XXX Reunião Técnica da Cultura do Arroz Irrigado**. Bento Gonçalves, RS: SOSBAI, 2016.

SUZUKI, N. *et al.* ROS and redox signalling in the response of plants to abiotic stress. **Plant, Cell & Environment**, v. 35, n. 2, p. 259-270, 2012.

TUNES, L. V. M. de *et al.* Qualidade fisiológica, sanitária e enzimática de sementes de arroz irrigado recobertas com silício. **Revista Ceres**, [s.l.], v. 61, p. 675-685, 2014.

VIEIRA, A. R. *et al.* Marcador isoenzimático de dormência em sementes de arroz. **Revista Brasileira de Sementes**, [s.l.], v. 30, p. 81-89, 2008.

WANG, W. *et al.* The effect of storage condition and duration on the deterioration of primed rice seeds. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 9, p. 172, 2018.

YOU, J.; CHAN, Z. ROS regulation during abiotic stress responses in crop plants. **Frontiers in Plant Science**, [s.l.], v. 6, p. 1092, 2015.

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**, [s.l.], v. 8, n. 2, p. e57472, 2013.

ZHU, M. *et al.* Effects of harvest time on seed vigor, enzyme activity and gene expression of conventional japonica rice. **Archives of Agronomy and Soil Science**, [s.l.], [s.vl.], [s.n.], p. 1-16, 2020.

ZHU, Y. *et al.* Physiological and biochemical responses of four cassava cultivars to drought stress. **Scientific Reports**, [s.l.], v. 10, n. 1, p. 1-12, 2020.