

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROBIOLOGIA**

Jéssica Cezar Cassol

**ESTRESSE OXIDATIVO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS
COM DIETHOLATE, SILÍCIO E SUBMETIDAS AO FRIO E AO
DÉFICIT HÍDRICO**

Santa Maria, RS, Brasil
2019

Jéssica Cezar Cassol

**ESTRESSE OXIDATIVO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM
DIETHOLATE, SILÍCIO E SUBMETIDAS AO FRIO E AO DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Agrobiologia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestra em Agrobiologia**.

Orientador: Prof. Dr. Sidinei José Lopes

Santa Maria, RS, Brasil
2019

Cezar Cassol, Jéssica

ESTRESSE OXIDATIVO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM
DIETHOLATE, SILÍCIO E SUBMETIDAS AO FRIO E AO DÉFICIT
HÍDRICO / Jéssica Cezar Cassol.- 2019.

107 p.; 30 cm

Orientador: Sidinei José Lopes

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Programa de
Pós-Graduação em Agrobiologia, RS, 2019

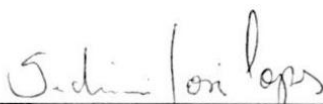
1. Estresse abiótico 2. Safeners 3. Oryza sativa L. 4.
Silício 5. Peroxidação de lipídeos I. Lopes, Sidinei José
II. Título.

Jéssica Cezar Cassol

**ESTRESSE OXIDATIVO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM
DIETHOLATE, SILÍCIO E SUBMETIDAS AO FRIO E AO DÉFICIT HÍDRICO**

Dissertação apresentada ao curso de
Mestrado do Programa de Pós-Graduação
em Agrobiologia, da Universidade Federal
de Santa Maria (UFSM, RS), como
requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestra em Agrobiologia.

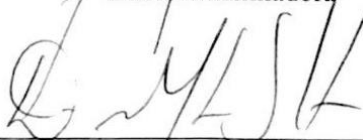
Aprovado em 10 de setembro de 2019:



Prof. Sidinei José Lopes, Dr. (UFSM)
Presidente/ Orientador



Sylvio Henrique Bidel Dornelles, Dr. (UFSM)
Banca examinadora



Danie Martini Sanchotene, Dr. (URI)
Banca examinadora

**Santa Maria, RS
2019**

DEDICATÓRIA

Dedico à comunidade técnica e acadêmica de agronomia, que sirva de informação e progresso para a agricultura brasileira.

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho não seria possível sem algumas pessoas fundamentais, e eu gostaria de agradecer:

A minha família pelo apoio e palavras de incentivo, com o aconchego familiar sendo base inicial para o desenvolvimento pessoal, pela confiança depositada, pelo afeto recebido, por toda forma de ajuda e por nunca medirem esforços pra que eu realizasse meus sonhos. Em especial ao meu pai Edson Cassol, que fostes minha fonte de inspiração e meu exemplo em todos os sentidos.

Ao prof. Dr. Danie Martini Sanchotene, meu prof. desde a graduação, o qual agradeço imensamente por me estimular a seguir a busca por conhecimento e aperfeiçoamento. Talvez sem o seu apoio, eu não estaria aqui hoje.

Em especial, agradeço ao prof. Dr. Sylvio Henrique Bidel Dornelles, por todos os ensinamentos transmitidos e trocas de ideia, por acreditar em mim e me proporcionar oportunidades que nunca poderei agradecer a altura.

Ao meu orientador, professor Dr. Sidinei José Lopes pela confiança em mim depositada e contribuições valiosas para o planejamento e condução dos experimentos, análise e interpretação dos resultados.

À profª Dr. Juçara Terezinha Paranhos, desde meu estágio na faculdade, por todos os ensinamentos transmitidos.

À profª Dra. Luciane Almeri Tabaldi pela disposição, dedicação e orientação nas análises relacionadas à peroxidação de lipídeos e enzimas antioxidantes.

À profª Dr. Hilda Hildebrand Soriani, que não mediu esforços para sanar dúvidas e me orientar sempre que precisei.

Aos membros do grupo interdisciplinar de pesquisa em herbologia (GIPHe), em especial aos graduandos de agronomia Eduarda Barreto, Maicon Pivetta, Juliana Soares, Elisandro Nunes, Júnior Fortes e Bernardo Damasceno, os quais sem eles não seria possível a realização desse trabalho. Eu serei sempre grata!

À minha colega e amiga Mestra Daniela Sponchiado, pelo apoio incondicional, pelas trocas de ideia e por nunca medir esforços por mim. Por toda ajuda na execução dos experimentos. Por me fazer rir em meio ao desespero, depois de longas horas dentro do laboratório, com experimentos minuciosos e cansativos. Por todas as vezes que só podíamos contar uma com a outra. Por me ajudar nas minhas ideias de “jerico” e passar trabalho junto a mim (mesmo sempre tendo uma solução mais rápida e fácil em mente). Por ser minha “cabeça pensante” quando o cansaço me tomava. Pela amizade que construímos, ter sido o melhor presente que o mestrado me proporcionou e por tornar esse percurso, mais leves. Por ser meu ombro amigo nos momentos difíceis e deixar que eu fosse o seu. Por todas as palavras de incentivos (e foram muitas) durante esses anos. E por acreditar tanto, que no final tudo iria dar certo, que me fazia acreditar também. Muito obrigada!

Aos colegas do Laboratório de Cultura de Tecidos: Douglas de Lima Righi, Lucas Menezes Jorge e Elisiane Vendrusculo pela mão de obra sempre que possível.

À minha amiga de longa data Anielly Nunes, pela amizade, conforto, apoio e carinho, principalmente nesses dois últimos anos turbulentos. Por sempre acreditar em mim e por todas as palavras de incentivo. Por sempre me entender melhor que eu e conseguir alegrar o mais triste dos meus dias. Obrigada por ser a irmã que eu não tive.

Ao meu namorado, Guilherme Missaggia Bertolo, pessoa fundamental para concretização desse percurso, desde ajuda nos experimentos, ao apoio nas horas de frustrações, as quais todo processo de mestrado proporciona na vida pessoal do estudante. Por celebrar

minhas pequenas conquistas como se fossem dele, por acreditar em mim e me impulsionar sempre. Pela amizade, companheirismo e por trazer leveza aos meus. Obrigada por tanto!

À família Bertolo, minha segunda família, pelo apoio confiança e amizade estando sempre do meu lado.

A todos os meus amigos que contribuíram direta e indiretamente com o sucesso deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

ESTRESSE OXIDATIVO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE, SILÍCIO E SUBMETIDAS AO FRIO E AO DÉFICIT HÍDRICO

AUTORA: Jéssica Cezar Cassol

ORIENTADOR: Dr. Sidinei José Lopes

O dietholate pode inibir enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD) e catalase (POD) que são importantes na desintoxicação celular do excesso de formas reativas de oxigênio, causadas por estresses abióticos ou bióticos, sendo um efeito indesejável para a planta. O silício (Si) é um estimulador enzimático e pode interferir no crescimento e no desenvolvimento de plantas ao promover sinalização para produção de compostos antioxidantes (SOD, POD). Nesse sentido, objetivou-se avaliar o efeito do Si na redução do estresse oxidativo em sementes de arroz tratadas com dietholate e submetidas ao frio e ao déficit hídrico. Para os experimentos de déficit hídrico, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado e os tratamentos com três repetições, arranjados em esquema fatorial 3x2x4x2: três condições hídricas do solo (50%, 100% da capacidade de retenção de água no solo (CRA) e lâmina d'água (5,0 cm)), duas cultivar (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 g L⁻¹) e duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio). As unidades experimentais foram vasos com 500 gramas de solo argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico, com seis plantas. Utilizou-se, para o experimento de estresse por frio, o mesmo delineamento e os tratamentos com três repetições, arranjados em esquema fatorial 3x2x2x4x2: três temperaturas (5, 10 e 20 °C), duas cultivar (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), dois tratamentos de semente (sem e com dietholate) quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹) e duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio). As unidades experimentais foram placas de petri com vinte sementes. O índice de clorofila *a* e *b*, a área foliar e o teor de massa seca da parte aérea e raiz aumentaram com o aumento das doses de Si nas três condições hídricas do solo. Houve um aumento na atividade das enzimas superóxido dismutase e guaiacol peroxidase nas cultivares estudadas à medida que as doses de Si aumentaram, diminuindo os danos oxidativos em nível celular, causados pela restrição hídrica. O processo germinativo das sementes de arroz, o índice e velocidade de germinação (IVG) e o comprimento de parte aérea e radícula, foi influenciado negativamente pelo tratamento de semente com dietholate, principalmente em temperatura de 5 e 10 °C. A cultivar IRGA 424 RI foi mais resistente ao estresse por baixas temperaturas e aos efeitos fitotóxicos do protetor dietholate. A fonte de Si metassilicato de sódio foi mais eficiente para o aumento do percentual de germinação, IVG e comprimento de parte aérea e radícula, de sementes tratadas e não tratadas com dietholate. Portanto, o Si atenua o estresse por déficit hídrico e por frio em sementes de arroz tratadas com dietholate.

Palavras chaves: Estresse abiótico. Mitigação. Safeners.

ABSTRACT

EFFECT OF SILICON ON REDUCING OXIDATIVE STRESS IN DIETHOLATE-TREATED RICE SEEDS SUBMITTED TO COLD AND WATER DEFICIT

AUTHOR: Jéssica Cezar Cassol

ADVISOR: Sidinei José Lopes

Dietholate can inhibit antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD) and catalase (POD) that are important in cellular detoxification of excess reactive oxygen forms caused by abiotic or biotic stresses, This is an undesirable effect on the plant. The Silicon (Si) is an enzyme stimulator and can interfere with plant growth and development by promoting signaling for the production of antioxidant compounds (SOD, POD). In this sense, the objective of this study was to evaluate the effect of Si on the reduction of oxidative stress in rice seeds treated with dietholate and subjected to cold and water deficit. For water deficit experiments, was used a completely randomized design and treatments with three replications, arranged in a 3x2x4x2 factorial scheme: three soil water conditions (50%, 100% of soil water retention capacity (CRA) and water column (5.0 cm)), two cultivar (IRGA 424 RI and Guri INTA CL), four doses of Si (0, 4.0, 8.0 and 16 g L⁻¹) and two sources of Si (sodium metasilicate and potassium metasilicate). The experimental units were pots with 500 grams of dystrophic red-yellow argisol soil, with six plants. For the cold stress experiment, the same design and treatments with three replications, arranged in a 3x2x2x4x2 factorial scheme: three temperatures (5, 10 and 20 °C), two cultivar (IRGA 424 RI and Guri INTA CL), were used two seed treatments (without and with dietholate), four doses of Si (0, 4.0, 8.0 and 16 mg L⁻¹) and two sources of Si (sodium metasilicate and potassium metasilicate). The experimental units were petri dishes with twenty seeds. Chlorophyll index *a* and *b*, leaf area and dry matter content of shoot and root increased with increasing doses of Si in the three soil water conditions. There was an increase in the activity of the superoxide dismutase and guaiacol peroxidase enzymes in the studied cultivars as Si doses increased, decreasing the oxidative damage at the cellular level caused by water restriction. The germination process of rice seeds, the germination index and speed (IVG) and the shoot and root length were negatively influenced by the dietholate seed treatment, mainly at 5 and 10 °C, the cultivar IRGA 424 RI is more resistant to low temperature stress and the phytotoxic effects of dietholate protector. The Si metasilicate source was more efficient for increasing the germination percentage, IVG and shoot and root length of treated and non-dietholate treated seeds. Therefore, Si attenuates water stress and cold stress in dietholate-treated rice seeds.

Keywords: Abiotic stress. Mitigation. Safaner.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1** – Relação entre a concentração do índice de clorofila *a* e *b* das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, sob condições hídricas do solo e doses de Si de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.....41
- Figura 2** – Relação da atividade enzimática da guaiacol peroxidase (POD), na parte aérea das plantas de arroz, sob condições hídricas do solo: 50 e 100% da CRA e lâmina d'água (**a**) e da atividade enzimática da superóxido dismutase (SOD) (**b**) com as doses de Si (média das fontes metassilicato de sódio e metassilicato de potássio e, das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL). Santa Maria, RS, 2019.....46

CAPÍTULO II

- Figura 1** – Relação entre a porcentagem de germinação das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL, com e sem tratamento de semente com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de Si de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.....68
- Figura 2** – Relação entre o índice de velocidade de germinação das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL, com e sem tratamento de semente com dietholate, sob diferentes temperaturas doses de Si de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.....69

CAPÍTULO III

- Figura 1** – Relação entre o comprimento da parte aérea das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, tratadas e não tratadas com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de silício de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.....84
- Figura 2** – Relação entre o comprimento radicular das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, com e sem tratamento de semente com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de silício de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.....91

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

- Tabela 1** – Médias da massa seca da parte aérea e raiz de plantas de arroz, sob diferentes doses de Si e cultivares para os fatores fontes de Si e condições hídricas. Santa Maria, RS, 2019.....35
- Tabela 2** – Médias da massa seca da parte aérea e raiz de plantas de arroz, sob diferentes condições hídricas, fontes e doses de Si para o fator cultivar. Santa Maria, RS, 2019.....36
- Tabela 3** – Relação entre a concentração da massa seca da parte aérea e de raiz, e a peroxidação lipídica da parte aérea das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, sob condições hídricas do solo e doses de Si de diferentes fontes. Santa Maria, RS, 2019.....37
- Tabela 4** – Médias da área foliar de plantas de arroz, sob diferentes doses de Si para o fator condições hídricas do solo. Santa Maria, RS, 2019.....39
- Tabela 5** – Médias do índice de clorofila *a* e *b* na parte aérea de plantas de arroz sob diferentes doses e fontes de Si para o fator condições hídricas do solo. Santa Maria, RS, 2019.....40
- Tabela 6** – Médias da peroxidação de lipídios em parte aérea de arroz, sob diferentes doses de Si e cultivares para o fator condição hídrica. Santa Maria, RS, 2019.....44
- Tabela 7** – Médias da atividade enzimática da guaiacol peroxidase (POD) em parte aérea de arroz, sob diferentes doses de Si para o fator condições hídricas. Santa Maria, RS, 2019.....45

CAPÍTULO II

- Tabela 1** – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, em diferentes temperaturas, cultivares, fontes e doses de silício para o fator tratamento de semente com e sem dietholate. Santa Maria, RS, 2019.....60
- Tabela 2** – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, em diferentes fontes e doses de silício, cultivares, tratamento de semente com e sem dietholate para o fator temperatura. Santa Maria, RS, 2019.....61
- Tabela 3** – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, em diferentes temperaturas, doses de silício, cultivares, tratamento de semente com e sem dietholate para o fator fonte de silício. Santa Maria, RS, 2019.....62
- Tabela 4** – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, em diferentes fontes e doses de silício, temperaturas e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator cultivares. Santa Maria, RS, 2019.....63
- Tabela 5** – Médias do índice e velocidade de germinação de sementes de arroz, em diferentes temperaturas, fontes e doses de silício e cultivares para o fator tratamento de sementes com e sem dietholate. Santa Maria, RS, 2019.....67
- Tabela 6** – Médias do índice e velocidade de germinação de sementes de arroz, em diferentes fontes e doses de silício, cultivares e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator temperaturas. Santa Maria, RS, 2019..... 68
- Tabela 7** – Médias do índice e velocidade de germinação de sementes de arroz, em diferentes temperaturas, doses de silício, cultivares e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.....70

CAPÍTULO III

Tabela 1 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, em diferentes temperaturas, fontes e doses de silício e cultivares para o fator tratamento de sementes com e sem dietholate. Santa Maria, RS, 2019.....	82
Tabela 2 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, em diferentes fontes e doses de silício, cultivares e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator temperaturas. Santa Maria, RS, 2019.....	86
Tabela 3 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, em diferentes temperaturas, fontes e doses de silício e tratamento de sementes com e sem dietholate. Para o fator cultivares. Santa Maria, RS, 2019.....	87
Tabela 4 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, em diferentes temperaturas, doses de silício, cultivares e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.....	88
Tabela 5 – Médias do comprimento da radícula de plântulas de arroz, em diferentes temperaturas, fontes e doses de silício e cultivares para o fator tratamento de sementes com e sem dietholate. Santa Maria, RS, 2019... ..	89
Tabela 6 – Médias do comprimento da radícula de plântulas de arroz, em diferentes fontes e doses de silício, cultivares e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator temperaturas. Santa Maria, RS, 2019.....	92
Tabela 7 – Médias do comprimento da radícula de plântulas de arroz, em diferentes fontes e doses de silício, temperaturas e tratamento de sementes com e sem dietholate. Para o fator cultivares. Santa Maria, RS, 2019.....	93
Tabela 8 – Médias do comprimento da radícula de plântulas de arroz, em diferentes temperaturas, doses de silício, cultivares e tratamento de sementes com e sem dietholate para o fator fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.....	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	13
1.1 OBJETIVOS	16
1.11 Objetivo Geral.....	16
1.12 Objetivos Específicos.....	16
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 FORMAS REATIVAS DE OXIGÊNIO (EROs).....	17
2.2 A CULTURA DO ARROZ.....	18
2.3 DIETHOLATE COMO PROTETOR DE SEMENTES DE ARROZ.....	19
2.4 MECANISMOS ENZIMÁTICOS DE PROTEÇÃO DE EROs.....	21
2.5 SILÍCIO COMO PROTETOR DAS CÉLULAS AOS EFEITOS DE EROs.....	22
REFERÊNCIAS.....	24
3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	27
4. CAPÍTULO I: SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE <i>Oryza sativa</i> L. TRATADAS COM DIETHOLATE.....	29
5. CAPÍTULO II: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR FRIO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE.....	53
6. CAPÍTULO III: SILÍCIO NO CRESCIMENTO DE PLANTULAS DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE E SUBMETIDAS A ESTRESSE POR FRIO.....	75
7. CONCLUSÕES GERAIS.....	98
ANEXO A: Fotos do capítulo I	99
ANEXO B: Fotos do capítulo II.....	101
ANEXO C: Fotos do capítulo III.....	104

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do arroz irrigado destaca-se pela produção e área cultivada, representando, além de importante fonte de renda, base nutricional da alimentação da população de diversos países (SILVA et al., 2019). E estresses bióticos e abióticos são causadores de prejuízos à produção mundial (MEENA et al., 2017). Vários estresses pelos quais passam as plantas de arroz, dizem respeito às complexas condições do meio ambiente onde crescem, déficit hídrico (BODNER et al., 2015), desbalanço nutricional (PAUL et al., 2014), danos por microorganismos patogênicos e insetos (COMPANT et al., 2005), temperatura (ROSA et al., 2017) e competição com plantas daninhas (SANCHOTENE et al., 2010).

Sabe-se que as plantas daninhas constituem um dos fatores que mais prejudicam o desenvolvimento e a produtividade da cultura do arroz, dada sua capacidade de competição e demais mecanismos de interferência, o que se reflete na redução quantitativa e qualitativa da produção da cultura (SILVA; DURIGAN, 2006). Em função da dificuldade de controlar muitas destas plantas daninhas, via aplicação foliar de herbicidas, é necessário aplicá-los via solo. E o principal herbicida amplamente utilizado, nas áreas produtoras de arroz, é o clomazone, um pré-emergente, cujo mecanismo de ação inibe a síntese de carotenóides e interfere na fotossíntese (SANCHOTENE et al., 2010).

O clomazone, sendo um graminicida, é tolerado pela cultura do arroz até determinadas doses, dependendo do tipo de solo onde é aplicado (SILVA et al., 2005). Porém, para controlar as principais gramíneas competidoras do arroz são necessárias doses superiores às usualmente aplicadas durante o ciclo da cultura, sendo que estas podem provocar fitotoxicidade no arroz, interferindo negativamente no desenvolvimento das plântulas pós-germinação e na emissão de perfilhos.

Desta forma, são amplamente utilizados protetores de sementes, também denominados de “safeners”, como forma de proteger as sementes dos efeitos deletérios de altas doses do herbicida clomazone (KARAM et al., 2003). Os protetores de sementes são agentes químicos que reduzem a fitotoxicidade de herbicidas nas culturas, por meio de mecanismo fisiológico ou molecular sem comprometer a eficiência do controle de plantas daninhas (ROSA et al., 2017). Um dos exemplos mais conhecidos e utilizados desses protetores é o dietholate, que inibe a enzima citocromo P450 mono-oxigenase, a qual é responsável pela ativação do herbicida clomazone (YUN et al., 2005). Não sendo hidroxilado, o clomazone perde a capacidade herbicida, sendo conjugado com açúcares no citoplasma e carregado para os

vacúolos das células por intermédio de carregadores de membrana do tonoplasto (FERHATOGLU et al., 2005). Entretanto, o dietholate pode induzir também a inibição de enzimas antioxidantes SOD (superóxido dismutase), a GST (glutamina sintetase) (YUN et al., 2005) que são importantes na desintoxicação celular do excesso de espécies reativas de oxigênio (EROs), que são produzidas durante estresses bióticos e abióticos, causando a deterioração dos fotossistemas, desnaturação de proteínas, peroxidação de lipídeos, rompimento de membranas e extravasamento do conteúdo celular, dentre outros, conduzindo a célula ao colapso e conseqüentemente, morte (SILVA et al., 2019). Sendo essas EROs, do ponto de vista da proteção das plântulas, um efeito indesejável.

Em sementes de arroz, ao inibir enzimas que atuam sobre EROs o dietholate pode interferir no desenvolvimento inicial de plântulas, redundando em menor vigor destas e no atraso na emergência (ROSA et al., 2017), efeitos que podem estar relacionados ao acúmulo de substâncias que peroxidam membranas (KARAM et al., 2003; INOUE et al., 2014), prejudicando a formação de tecidos e, conseqüentemente, o crescimento das plântulas. Este efeito do dietholate sobre as sementes e plântulas de arroz, tem sido observado em campo, com maior intensidade quando passam por estresses abióticos como déficit hídrico ou baixas temperaturas do solo (AGARIE et al., 1998). Os maiores danos têm sido relacionados aos estágios entre a germinação e a emergência (ROSA et al., 2017). Porém, pouco se sabe sobre os possíveis efeitos estressores do dietholate desencadeados por déficit hídrico ou por frio, apesar de serem citados constantemente pelos rizicultores.

Em função destes estresses abióticos, medidas de mitigação têm sido avaliadas no sentido de tentar aliviar as plantas do estresse oxidativo causado pelas EROs induzidas por frio ou déficit hídrico. Entre estas medidas, tem sido estudado o uso do silício como um indutor de resistência, seja em tratamento de sementes como em aplicações via solo ou foliar.

O silício é um dos elementos minerais que é citado como desencadeador da sinalização para a produção de enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX), relacionadas ao mecanismo de defesa das plantas contra as EROs (ASHRAF et al., 2010). Também ativa a expressão de genes envolvidos na produção de compostos secundários do metabolismo, como polifenóis e outras fitoalexinas (GRATÃO et al., 2005). A produção destes compostos pode ser resultado do efeito indireto da acumulação de silício nas plantas (SHEN et al., 2010). Outros benefícios do silício dizem respeito à proteção ao estresse por déficit hídrico (AGARIE et al., 1998; GONG et al., 2005) em função de estimular a sinalização para produção de compostos osmoprotetores como prolina, glicina-betaína, poliálcoois entre outros (ETESAMI et al., 2017). Da mesma forma, estimulando a

produção de compostos osmoprotetores, o silício pode ativar as defesas das células vegetais aos efeitos estressores das baixas temperaturas (ROSA et al., 2017). Assim, o silício pode trazer benefícios à cultura do arroz quando esta for semeada em condições de frio ou sob baixa umidade do solo, restando avaliar o seu possível papel na mitigação de efeitos tóxicos pelo protetor de semente dietholate.

Neste contexto, sendo necessário tratar sementes de arroz com o protetor dietholate para proteger dos efeitos fitotóxicos do clomazone e, na insuficiência de mais estudos conclusivos que demonstrem a ocorrência de danos desencadeados por déficit hídrico ou por frio associadas ao efeito estressor do dietholate nas sementes, bem como o provável papel do silício como um estimulador de defesas das plantas a estes estresses, é o que embasa a presente dissertação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito do silício como mitigador de estresse hídrico ou por frio, em sementes de arroz, tratadas com dietholate.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar o efeito de doses e fontes de silício em sementes de duas cultivares de arroz tratadas com dietholate e sob estresse por baixas temperaturas no período de germinação e desenvolvimento inicial de plântula, através dos testes de: germinação, índice e velocidade de germinação e comprimento de parte aérea e radícula.
- Avaliar o efeito de doses e fontes de silício aplicadas no sulco de semeadura de duas cultivares de arroz, tratadas com dietholate e sob três condições de umidade do solo: 50% da CRA (capacidade de retenção de água no solo), 100% da CRA e lâmina de água de 5 centímetros, verificando os teores de clorofila *a* e *b*, área foliar e massa seca de parte aérea e raiz.
- Determinar a capacidade do silício de incrementar o sistema antioxidante das plantas de arroz, tratadas com dietholate, sob déficit hídrico, através da análise da peroxidação de lipídeos e quantificação das enzimas superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POD).

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FORMAS REATIVAS DE OXIGÊNIO (EROS)

O oxigênio que apareceu na atmosfera da Terra principalmente como um produto da fotossíntese, apresenta vantagens e desvantagens para os organismos aeróbicos. Ele permite uma eficiente produção energética por combustão enzimática de compostos orgânicos, mas ao mesmo tempo o oxigênio é o líder dos danos aeróbicos na célula devido à produção de formas reativas de oxigênio (EROs) que reagem com todas as classes de biomoléculas (BARTOSZ, 1997). Durante milhões de anos de evolução, os organismos aeróbicos se adaptaram a esta ameaça apresentada pelo oxigênio com a elaboração de um sistema antioxidante minimizando as ações prejudiciais das EROs, e até mesmo através do emprego destas espécies, como meio de defesa e talvez, como um mensageiro secundário (KHAN; WILSON, 1995).

São inúmeros os fatores que podem contribuir para o aumento dos níveis de EROs, radiação UV, luminosidade intensa, herbicidas, ataque de patógenos, certas injúrias, hiperoxia, ozônio, flutuações na temperatura (Scandalios, 1994), seca, metais pesados, concentração elevada de sais, extremos de temperatura, poluição do ar (MALLICK; MOHN, 2000).

As EROs são formas reduzidas de oxigênio que são energeticamente mais reativas que o oxigênio molecular, ou seja, são compostos que tem maior facilidade em reagir com outras substâncias podendo gerar uma cascata de reações. As formas mais comuns de EROs encontrados nas células são: radicais superóxido (O_2^-), hidroxila (OH^-), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), oxigênio singleto (1O_2) (D'AUTRÉAUX; TOLEDANO, 2007; BHATTACHARJEE, 2010).

Os radicais de superóxido (O_2^-) são os primeiros a serem produzidos através da redução de O_2 durante o transporte de elétrons na via fotossintética nos cloroplastos e em torno de 1 a 2% do O_2 consumido conduz a geração de $O_2^{\cdot-}$. Este superóxido é mais reativo que OH^{\cdot} , e possivelmente mais que 1O_2 e cada uma destas formas podem causar peroxidação da membrana lipídica e enfraquecimento celular (HALLIWELL, 2006).

Os radicais hidroperoxila (HO_2^-) que são formados a partir do O_2^- por protonação em soluções aquosas podem atravessar as membranas biológicas e subtrair átomos de hidrogênio de ácidos graxos poliinsaturados e hidroperóxidos de lipídeos, iniciando então, a auto-oxidação de lipídeos (BHATTACHARJEE, 2010).

O radical hidroxila (OH^\cdot) é o mais reativo das EROs, sendo formado a partir de O_2^- ou H_2O_2 na reação de Haber-Weiss. O radical OH^\cdot pode reagir potencialmente com todas as moléculas biológicas, tais como DNA, proteínas, lipídeos e praticamente qualquer componente celular. Como as células não possuem mecanismos enzimáticos para eliminar essa espécie altamente reativa, seu acúmulo pode levar à morte celular (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 1989).

O peróxido de hidrogênio H_2O_2 é moderadamente reativo, não possui carga, apresenta uma longa meia-vida celular (1 ms) e tem a capacidade de difundir-se livremente através das membranas, migrando para distintos compartimentos. Sendo assim, propaga os danos e atua como mensageiro da condição de estresse (GADJEV et al., 2008; KARUPPANAPANDIAN et al, 2011). Entre os processos induzidos pelo peróxido de hidrogênio estão: fechamento estomático, formação de ligações transversais na parede celular, expressão de genes relacionados a respostas ambientais, biogênese de peroxissomos, dentre outros. Além disso, o H_2O_2 pode também inativar enzimas por oxidação de seus grupos tiol, induzir enzimas como catalase e peroxidase, provocar danos aos ácidos nucleicos, proteínas e lipídeos (KARUPPANAPANDIAN et al, 2011).

O oxigênio singlete ($^1\text{O}_2$) por muito tempo foi considerado uma molécula fortemente tóxica, porém de pouca difusão e, devido a isso, com capacidade apenas de provocar danos próximo ao seu local de produção (FOYER et al., 1994). Semelhante aos radicais hidroxila possui, aproximadamente (< 2 ms) de vida e grande potencial destrutivo, reagindo com várias biomoléculas. Em estudos atuais, têm sido observado que o $^1\text{O}_2$ pode percorrer distâncias significativas a partir do seu sítio de produção, sendo responsável, de modo geral, pela peroxidação lipídica que ocorre nos cloroplastos. (TRANTAPHYLIDES; HAVAUX, 2009).

Por serem composto que reagem facilmente com outras moléculas, podem levar a oxidação de componentes celulares importantes como membranas celulares, lipídeos e até mesmo do material genético da célula. Essa oxidação leva a desestabilidade das membranas, mutações prejudiciais e paralisação de processos metabólicos essenciais à sobrevivência por toxicidade, podendo levar a morte celular. E como resposta ao acúmulo de EROs, em especial os radicais superóxido e peróxido de hidrogênio, as plantas desenvolveram mecanismos de defesa enzimáticos e não enzimáticos com potencial para combater a toxicidade das EROs.

2.2 A CULTURA DO ARROZ

O arroz (*Oryza sativa*) é uma monocotiledônea da família das poáceas e pertence ao

grupo fotossintético C3, constituindo-se como o segundo cereal mais cultivado no mundo. O Brasil produz 12 milhões de toneladas de arroz, sendo que os estados sul-brasileiros participam com 80% de toda produção nacional (SOSBAI, 2018). O Rio Grande do Sul obteve na safra de 2018/2019 produtividade média de 7.594 kg/ha⁻¹ isso representa -3,37% em relação ao obtido ano passado (EMATER, 2019). Estando aquém do potencial produtivo estimado para as principais cultivares semeadas tais como: Guri INTA CL, Puitá INTA CL e IRGA 424 RI. Estas cultivares tem potencial genético para produzir até 12 toneladas ha⁻¹, em ótimas condições de cultivo (SOSBAI, 2017).

Diversos fatores prejudicam a produtividade da cultura de arroz. Entre eles a interferência por competição das plantas daninhas poáceas (gramíneas). Em função da dificuldade de controlar muitas destas poáceas via aplicação foliar de herbicidas, é necessário aplicá-los via solo. O principal herbicida amplamente utilizado nas áreas produtora de arroz do RS é o clomazone, um pré-emergente, cujo mecanismo de ação inibe a síntese de carotenoides e interfere na fotossíntese.

O graminicida clomazone, é tolerado pela cultura do arroz até determinadas doses, dependendo do tipo de solo onde é aplicado (SANCHOTENE et al., 2010). Porém, para controlar as principais gramíneas competidoras do arroz são necessárias doses superiores as usualmente aplicadas durante o ciclo da cultura, sendo que estas podem provocar fitotoxicidade no arroz, interferindo negativamente no desenvolvimento das plântulas pós-germinação e na emissão de perfilhos.

Desta forma, preventivamente, as sementes são tratadas com produtos químicos denominados “safeners”, que visam proteger as plântulas de fitotoxicidade por herbicidas, (INOUE et al., 2014), conferindo a uma espécie susceptível o poder de se tornar tolerante a um determinado herbicida, sem que a ação tóxica do produto em relação às plantas daninhas seja prejudicada.

2.3 DIETHOLATE COMO PROTETOR DE SEMENTES DE ARROZ

O protetor, organofosforado, dietholate é um “safener” utilizado no tratamento de sementes de arroz (SANCHOTENE et al., 2010) com o propósito de proteger as plântulas do efeito fitotóxico do herbicida clomazone. O dietholate é considerado um protetor de sementes de arroz e de algodão por inibir em plântulas recém-germinadas o complexo enzimático citocromo P₄₅₀ mono-oxigenase, que é responsável pela ativação do efeito tóxico do herbicida clomazone ao transformá-lo, por hidroxilação, em 5-ceto-clomazone, um metabólito tóxico

para as plantas (FERHATOGLU et al., 2005; TENBROOK et al., 2006).

O arroz tolera baixas doses de clomazone (ROSA et al. 2017). Porém, para controle das principais plantas competidoras do arroz, que são poáceas, é necessário o uso de doses de clomazone superiores às toleradas pelo arroz (SANCHOTENE et al., 2010). Desta forma é que o dietholate, na atualidade, desempenha importante papel no manejo de plantas daninhas, ao proteger o arroz, via tratamento de sementes, dos danos fitotóxicos do herbicida clomazone. O clomazone hidroxilado é conjugado com açúcares celulares e é atraído por carregadores do tonoplasto, sendo compartimentalizado no vacúolo, perdendo seu efeito herbicida (KARAM et al. 2003; SANCHOTENE et al., 2010).

Porém, muito se tem discutido que o dietholate pode induzir a inibição de enzimas antioxidantes, tais como: SOD, POD e CAT, que são importantes na desintoxicação celular do excesso de EROs, sendo do ponto de vista da proteção das plântulas um efeito indesejável. Estas formas reativas de oxigênio peroxidam lipídeos e interferem na divisão celular, atrasando ou reduzindo a germinação de sementes e/ou o vigor de plântulas (INOUE et al., 2012; ROSA et al., 2017), prolongando o ciclo da cultura por aumentar o tempo para emergência e por interferência na emissão de perfilhos. Pesquisas têm evidenciado que estes efeitos deletérios causados pelo dietholate pode ser desencadeados por estresses de baixas temperaturas (ROSA et al., 2017) ou déficit hídrico (MAUAD et al., 2011). Para reduzir estes efeitos, produtos formulados contendo alguns minerais essenciais e fitohormônios, chamados de bioestimulantes (INOUE et al., 2012), tem sido utilizados.

O sucesso destes bioestimulantes, preconizados como reguladores da atividade metabólica em plantas, normalmente deve-se a elementos minerais como o zinco (INOUE et al., 2014) ou o silício (MAUAD et al., 2011) que são estimuladores enzimáticos (TAIZ et al., 2017) e podem interferir no crescimento e o desenvolvimento de plantas ao promover sinalização para produção de compostos antioxidantes (ETESAMI et al., 2017). Aplicados em tratamento de sementes ou diretamente nas folhas, estes compostos estimulam as plantas ao crescimento da parte aérea e de raízes, bem como, à produção de metabólitos (INOUE et al., 2012) que minimizam danos provocados pelo acúmulo celular das EROs (MAUAD et al., 2011). Entretanto não há estudos conclusivos sobre a efetiva eficácia destes produtos em mitigar os estresses provocados pelo uso do dietholate, correlacionados ou não por déficit hídricos e/ou estresse por frio.

2.4 MECANISMOS ENZIMÁTICOS DE PROTEÇÃO DE EROs

Expor as plantas a estresses bióticos e abióticos pode aumentar a produção de espécies reativas de oxigênio, tais como $^1\text{O}_2$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ e H_2O_2 e OH^{\cdot} (D'AUTRÉAUX & TOLEDANO, 2007; BHATTACHARJEE, 2010). Para sua própria proteção contra estes tóxicos intermediários de oxigênio, as células das plantas e suas organelas, como cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos empregam um sistema de defesa antioxidante. Os sistemas antioxidantes são divididos em dois grupos principais, os não enzimáticos e os enzimáticos.

Os não enzimáticos, pode-se destacar o ascorbato (AsA), a glutatona (GSH), o β -caroteno e o α -tocoferol (Serkedjieva, 2011). E os componentes do grupo enzimático são as enzimas: superóxido dismutase (SOD), a ascorbato peroxidase (APx), a glutatona peroxidase (GPx), a catalase (CAT), a glutatona S-transferase, peroxidases (não-específicas), a monodesidroascorbato redutase (MDHAR) e a desidroascorbato redutase (DHAR) (APEL; HIRT, 2004 SACANDALIOS, 2005) que retiram, neutralizam ou eliminam as formas reativas de oxigênio (EROs) (SHAH et al., 2001).

As SODs atuam na primeira linha de defesa contra as EROs, removem $\text{O}_2^{\cdot-}$, catalisando a sua dismutação, onde um $\text{O}_2^{\cdot-}$ é reduzido a H_2O_2 e outro oxidado a O_2 . Ela remove $\text{O}_2^{\cdot-}$ e, portanto, diminui o risco de formação de OH^{\cdot} no interior celular. As superóxidos dismutases são classificadas segundo os seus cofatores de metal em três tipos conhecidos: o cobre/zinco (Cu/Zn-SOD), o manganês (Mn-SOD) e o ferro (Fe-SOD), que estão localizados em diferentes compartimentos celulares (MITTLER, 2002; GILL; TUTEJA, 2010).

As enzimas APx, GPx e CAT subsequentemente detoxificam o peróxido de hidrogênio. Ao contrário da CAT, a APx requer um sistema de regeneração do ascorbato e GSH, o ciclo do ascorbato-glutatona.

Sob condições estressantes como o déficit hídrico ou por frio, solutos compatíveis ou osmólitos também podem ser produzidos nas plantas, especialmente prolina (PEI et al., 2010) e glicina-betaína (MANSOUR, 1998) protegendo as células dos efeitos de EROs.

Assim as respostas bioquímicas e fisiológicas de plantas ao estresse oxidativo incluem um sistema de defesa antioxidante, que envolve a atividade das enzimas, além de metabólitos não enzimáticos, que, de forma conjunta, atuam na eliminação das EROs e na redução/proteção ao dano oxidativo.

2.5 SILÍCIO COMO PROTETOR DAS CÉLULAS AOS EFEITOS DE EROs

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante no solo (EPSTEIN e BLOOM, 2006), encontrado em concentrações no tecido vegetal da maioria das plantas, que lhe garante a classificação como macronutriente (TAIZ et al. 2017). De acordo com Rodrigues et al. (2011), plantas que crescem em ambiente rico em silício, diferem daquelas presentes em condições de deficiência, principalmente quanto à tolerância a fatores abióticos.

A tolerância de plantas a condições desfavoráveis, principalmente em relação ao déficit hídrico, tem sido associada ao acúmulo de enzimas na parte aérea, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta, a partir da redução do potencial hídrico celular, levando, conseqüentemente, ao fechamento dos estômatos e ao desenvolvimento de processos oxidativos, por meio do acúmulo de prolina, considerada como mecanismo regulador de perda de água na planta, além da formação das espécies reativas de oxigênio (EROs): as enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (GRATÃO et al., 2005).

Sabe-se que o Si é um dos elementos minerais que é citado como desencadeador da sinalização para a produção de enzimas como SOD, CAT e APX, e estas enzimas atuam como antioxidantes e estão relacionadas ao mecanismo de defesa das plantas contra as EROs (ASHRAF et al., 2010), também, ativa a expressão de genes envolvidos na produção de compostos secundários do metabolismo, como polifenóis e outras fitoalexinas (GRATÃO et al., 2005). Outros benefícios do silício dizem respeito à proteção ao estresse por déficit hídrico (AGARIE et al., 1998; GONG et al., 2005; YIN et al., 2013) em função de estimular a sinalização para produção de compostos osmoprotetores, tais como: prolina, glicina-betaína, poliálcoois, entre outros (ETESAMI et al., 2017). A glicina betaína, a qual possui alta afinidade pela água (LOBATO et al., 2009), protege as membranas dos tilacóides, o que mantém a eficiência fotoquímica na fotossíntese (ASHRAF; FOOLAD, 2007). A prolina, como aminoácido e antioxidante não enzimático (ASHRAF; FOOLAD, 2007) atua, principalmente na osmoproteção (CAYLEY et al., 1992), na estabilização de proteínas e na proteção das membranas contra os efeitos deletérios das EROs (SHARMA; DUBEY, 2005). O aumento nos níveis de prolina também atua no ajuste osmótico da planta, auxiliando na tolerância ao frio através da manutenção da integridade da membrana, evitando a desidratação celular provocada pela pressão osmótica (HUANG et al., 2012). Essas moléculas, prolina e glicina-betaína, são consideradas osmólitos chave para o ajuste osmótico de plantas em condições de estresse hídrico (NAYYAR, 2003) ou por frio.

Da mesma forma, a deposição de Si na parede celular das folhas, forma uma dupla camada protetora, evitando grandes perdas de água nestas condições de estresse hídrico, devido à menor taxa de evapotranspiração da planta (MARSCHNER, 1995), melhorando aproveitamento da água disponível no solo. Outros fatores relacionados ao silício são o aumento na resistência mecânica dos tecidos, maior tolerância a patógenos, favorecimento da absorção de nutrientes essenciais, indutor de pigmentos, a ajustes na ultraestrutura de cloroplastos sendo benéfico para a manutenção dos conteúdos de clorofila (EPSTEIN, 1999; MALAVOLTA, 2006; KAMENIDOU; CAVINS; MAREK, 2009; GONG, 2015; SOUZA, (2008); ZHU; GONG, 2014; AHMED et al., 2014). Por isso, tem sido muito estudado o efeito do silício como provável estimulador de defesas aos estresses bióticos e abióticos (MAUAD et al., 2011), restando avaliar o seu possível papel na mitigação de efeitos fitotóxicos por protetores de semente como o dietholate e por herbicidas.

REFERÊNCIAS

- AGARIE, S.; HANAOKA, N.; UENO, O; MIYAZAKI, A.; KUBOTA, F.; AGATA, W; KAUFMAN, P. B. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science*, Tokyo, v.1, n.1, p.96-103, 1998.
- ASHRAF, M. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. *Biotechnol Adv.* 28(1). p.169-183. 2010.
- ASHRAF, M., FOOLAD, M. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Exp. Bot.*, v. 59, p. 206-216, 2007.
- BARTOSZ, G. Oxidative stress in plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, v. 19, p. 47-64, 1997.
- BHATTACHARJEE, S. Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2010. p.1-30.
- BHATTACHARJEE, S. Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, p.1-30, 2010.
- BODNER, G; NAKHFOROOSH, A; KAUL, H.P. management of crop water under drought: a review. *Agronomy Sustainability*. V. 35, p.401-442. 2015.
- COMPANT, S; DUFFY, B; NOWAK, J; CLEMENT, C; BORKA, E.A. use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action and future prospects. *Appl. Environmental Microbiology*. V. 71, p.4951-4959. 2005.
- D'AUTRÉAUX, B.; TOLEDANO, M.B. ROS as signalling molecules: mechanisms that generate specificity in ROS homeostasis. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, v.8, p.813-824, 2007. Disponível em: . Acesso em: 27 jun. 2012.
- EMATER. (2019) - *Empresa Brasileira para a Pesquisa Agropecuária*. Estimativa de safra para grãos de verão. Disponível em: <<http://www.emater.rs.gov.br>. Acesso em 23 julho.
- ETESAMI, H.; JEONG, B.R; Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 147. p.881-896. 2017.
- FERHATOGLU, Y.; BARRET, M. Studies of clomazone mode of action. *Pestic. Biochem. Physiol.*, v. 85, n. 1, p. 7-14, 2006.
- GADJEV, I. et al. Programmed cell death in plants: new insights into redox regulation and the role of hydrogen peroxide. *International Review of Cell and Molecular Biology*, v.270, p.87-144, 2008. Disponível em: . Acesso em: 12 set. 2012.

- GONG, H; ZHU, X; CHEN, K; WANG, S; ZHANG, C. Silicone alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*. 169. p.313-321. 2005.
- GRATAO P.L., POLLE A., LEA P.J., AZEVEDO R.A. making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, V. 32. p.481–494. 2005.
- HALLIWELL, B.; GUTTERIDGE, J.M.C. Free radicals in biology and medicine. *Oxford*, University Press. 1989
- INOUE, M.H.; ARAÚJO, T.D.C; MENDES, K.F; BEN,R; CONCIANI, P.A; eficiência do dietholate e bioestimulantes isolados e associados no tratamento de sementes de algodoeiro adensado com clomazone aplicado em pré-emergência. *Revista de Ciências Agro-ambientais*. V.10; n.2, p. 163-172, Alta Floresta, 2012.
- INOUE, M.H.; CAVALCANTE, N.R.; BEN,R.; MENDES, K.F.; POSSAMAI, A.N.S; DALLACRT, R. Seletividade do clomazone em sementes de algodão tratadas com dietholate e acetato de zinco. *Semina*. V. 35, n.6, p.2905-2918, Londrina, 2014.
- KAMENIDOU, S., CAVINS, J.C., MAREK, S., 2009. Evaluation of silicon as a nutritional supplement for greenhouse zinnia production. *Sci. Hort*. 119, 297–301.
- KARAM, D; CARNEIRO, A.A; ALBERT, L.H; CRUZ, M.B; COSTA, G.T.; MAGALHÃES, P.C. seletividade da cultura do milho ao herbicida clomazone por meio do uso de dietholate. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*. V.2, n.1, p.72-79, 2003.
- KARUPPANAPANDIAN, T. et al. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, v.5, n.6, p.709-725, 2011. Disponível em: . Acesso em: 29 jul. 2012.
- KARUPPANAPANDIAN, T. et al. Reactive oxygen species in plants: their generation, signal transduction, and scavenging mechanisms. *Australian Journal of Crop Science*, v.5, n.6, p.709-725, 2011.
- LOBATO AKS, COSTA RCL, NETO MAM, OLIVEIRA NETO CF, SANTOS FILHO BG, ALVES GAR, COSTA KC, SILVA LI, CONRADO TV, MALEIA MP (2009) Consequences of the water deficit on nitrogen compounds in pepper (cv. Vermelho gigante) plants. *Res J Biol Sci* 4: 760-764.
- MALAVOLTA, E. *Manual de nutrição mineral de plantas*. Piracicaba: Editora Ceres, 2006.
- MALLICK N.; MOHN F.H. Reactive oxygen species: response of alga cells. *Journal of Plant Physiology*, 157:183-193, 2000.
- MAUAD, M; CRUSCIOL, C.A.C; FILHO, H.G. produção de massa seca e nutrição de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. *Semina*. V. 32, n.3, p.939-948. Londrina, 2011.
- MEENA, K.K; SORTY, A.M. BITLA, U.M. GUPTA, P; PARECK, A; SINGH, D.P. abiotic stress responses and microbe-mediated mitigation in plants: the omics strategies. *Plant Science*.

V. 8, 2017.

PAUL, D; LADE, H; plant-growthpromotingrhizobacteriato improve cropgrowth in saline soils: a review. *Agronomy Susteinability*. V.34, p.737-752. 2014.

ROSA, T.D; HELGUEIRA, D.B; ALMEIDA, A.S; SOARES, V.N.; MATTOS, F.P; MEDEIROS, D.C. vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com dietholate isolado e em combinação em duas temperaturas. *Tecnol. & Ciência Agropecuária*. V.11, n.2, p.59-62; João Pessoa. 2017.

SANCHOTENE D.M; KRUSE, N.D.; AVILA, L.A.; MACHADO, S.L.O; NICOLODI, G.A.; DORNELLES, S.H.B.D Efeito do protetor dietholate na seletividade de clomazone em cultivares de arroz irrigado. *Planta Daninha*. V. 28, n.2, p.339-346. Viçosa. 2010.

SCANDALIOS J.G., ACEVEDO A., RUZSA S. Catalase gene expression in response to chronic high temperature stress in maize. *Plant Science*, 156:103-110, 2000.

SHARMA, P.; DUBEY, R. S. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminium toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. *Journal of Plant Physiology*, v. 162, p. 854-862, 2005.

SHEN, X; ZHOU, Y; DUAN, L; LI, Z; ENEJI, A.E; LI, J; silicone effectsonphotosynthesisand antioxidante parametersofsoybeanseedlingsunderdroughtand ultravioleta-beta radiation. *JournalPlantPhysiology*. V.167. p.1248-1252.

SILVA, K. S. ; TABALDI, L. A. ; ROSSATO, L. V. ; BASILIO, V. B. ; CAVICHIOLI, B. M. ; MACHADO, S. L. O. . Contents of Pigments and Activity of Antioxidant Enzymes in Rice Plants Pre-Treated with Sodium Nitroprusside and Exposed to Clomazone. *Planta Daninha*, v. 37, p. 1-10, 2019.

SILVA, A.A.; SILVA, J.F.; FERREIRA, F.A.; FERREIRA, L.R.. Proteção de Plantas – Manejo de Plantas Daninhas. Viçosa: ABEAS – Curso de Proteção de Plantas, 2005, 217p. Silva, M.R.M., & Durigan, J.C.. (2006). Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura do arroz de terras altas: I - Cultivar IAC 202. *Planta Daninha*, 24(4), 685-694.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Farroupilha: SOSBAI, 2018. 10 p.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Pelotas: SOSBAI, 2017. 164 p.

TAIZ L , ZEIGER E., MOLLER I. M., MURPH A., *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6ª ed. Artmed Editora S.A., 120p. 2017

TENBROOK, P. L.; TJEERDEMA, R. S. Biotransformation of clomazone in rice (*Oryza sativa*) and early watergrass (*Echinochloa oryzoides*). *Pestic. Biochem. Physiol.*, v. 85, n. 1, p. 38-45, 2006.

TRIANANTAPHYLIDES C.; HAVAUX, M. Singlet oxygen in plants: production, detoxification and signaling. *Trends in Plant Science*, v.14, n.4, p.219-229, 2009.

3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A cultura de arroz é importante para economia da metade sul e o desenvolvimento regional na depressão central do Rio Grande do Sul (RS). Entretanto, diversos fatores prejudicam a produtividade da cultura de arroz. Sabe-se que as plantas daninhas constituem um dos fatores que mais prejudicam o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade da cultura, dada sua capacidade de competição e demais mecanismos de interferência, o que se reflete na redução quantitativa e qualitativa da produção de arroz. Em função da dificuldade de controlar muitas destas plantas daninhas, geralmente da mesma família do arroz (poáceas) via aplicação foliar de herbicidas, é necessário aplicá-los via solo. Sendo o clomazone o principal herbicida, amplamente utilizado, nas áreas produtoras de arroz do RS, um pré-emergente, cujo mecanismo de ação inibe a síntese de carotenoides e interfere na fotossíntese. Porém, doses superiores de clomazone, às usualmente aplicadas, são necessárias para controlar as principais gramíneas competidoras do arroz, sendo que estas podem provocar fitotoxicidade no arroz. Desta forma, é amplamente utilizado o protetor dietholate como forma de proteger as sementes, buscando reduzir os efeitos fitotóxicos do clomazone sobre plântulas. Contudo, o dietholate pode também induzir uma inibição de enzimas antioxidantes que são importantes na desintoxicação celular do excesso de formas reativas de oxigênio (EROs), sendo do ponto de vista da proteção das plântulas um efeito indesejável.

Nas últimas safras, os rizicultores tem relacionado aumento de efeitos estressores do dietholate sobre sementes da cultivar Guri INTA CL, com estresses por frio ou por estresses hídricos ocorridos na fase de semeadura-germinação. Entretanto, poucos estudos demonstrando estas correlações aventadas.

Nesse sentido, o principal objetivo da presente dissertação foi a investigação desses relatos. Assim, também se havia a possibilidade de minimizar esses efeitos fitotóxicos do dietholate, através da utilização do silício, aplicado via tratamento de sementes ou no sulco de semeadura, buscando entender os efeitos benéficos do silício como bioestimulante do sistema antioxidante em sementes e plantas de arroz.

Os resultados obtidos, bem como, a discussão destes estão apresentados a seguir em três capítulos formatados como artigos completos:

CAPÍTULO I: SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE *Oryza sativa* L. TRATADAS COM DIETHOLATE

CAPÍTULO II: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR FRIO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE

CAPÍTULO III: SILÍCIO NO CRESCIMENTO DE PLANTULAS DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE E SUBMETIDAS A ESTRESSE POR FRIO

**4. CAPÍTULO I: SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM
PLANTAS DE *Oryza sativa* L. TRATADAS COM DIETHOLATE**

SILÍCIO COMO ATENUADOR DE ESTRESSE HÍDRICO EM PLANTAS DE *Oryza sativa* L. TRATADAS COM DIETHOLATE

RESUMO

O silício (Si) é um elemento que pode proporcionar melhor crescimento e desenvolvimento às plantas de arroz cultivadas em ambientes com deficiência hídrica, por ser um estimulador enzimático, promovendo sinalização para produção de compostos antioxidantes. Assim, o objetivo deste trabalho foi estudar a relação entre deficiência hídrica e o efeito do Si em duas cultivares de arroz tratadas com dietholate. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três repetições e os tratamentos arranjados em esquema fatorial 3x2x2x4, sendo os fatores: três condições hídricas do solo (50%, 100% da capacidade de retenção de água no solo (CRA) e lâmina d'água de 5,0 cm), duas cultivares (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio) e quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 g L⁻¹). O índice de clorofila *a* e *b*, a área foliar e o teor de massa seca da parte aérea e raiz aumentaram com o aumento das doses de Si nas três condições hídricas do solo. Houve um aumento na atividade das enzimas superóxido dismutase e guaiacol peroxidase nas cultivares estudadas à medida que as doses de Si aumentaram, diminuindo os danos oxidativos em nível celular, causados pela restrição hídrica. Portanto, o Si atenua o estresse por déficit hídrico em sementes de arroz tratadas com dietholate.

Palavras-chave: Déficit hídrico. Arroz. Peroxidação de lipídeos.

SILICON AS AN ATTENUATOR OF WATER STRESS IN PLANTS OF *ORYZA SATIVA* L. TREATED WITH DIETHOLATE

ABSTRACT

Silicon (Si) is an element that can improve the growth and development of rice plants in water-deficient environments because it is an enzymatic stimulant, signaling for production of antioxidant compounds. Therefore, the aim of this study was to examine the relationship between water deficiency and the effect of Si on two rice cultivars whose seeds were treated with dietholate. The experimental design was fully randomized with three replicates, and treatments were organized in a 3x2x2x4 factorial arrangement: three water soil conditions (50% and 100% of soil water retention capacity (WRC) and complete submergence in a water column of 5.0 cm); two cultivars (IRGA 424 RI and Guri INTA CL); two sources of Si (sodium metasilicate and potassium metasilicate); and four rates of Si (0; 4.0; 8.0 and 16 g L⁻¹). Chlorophyll *a* and *b*, leaf area and shoot and root dry weight increased at higher rates of Si under the three soil water regimes. There was an increase in superoxide dismutase and guaiacol peroxidase enzyme activity in the cultivars at higher rates of Si, reducing cell oxidative damage caused by water deficiency. Therefore, Si did indeed attenuate water deficiency stress in rice plants emerging from seeds treated with dietholate.

Key words: water deficiency; rice; lipid peroxidation.

INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) está entre os cereais mais consumidos no mundo, sendo fundamental na alimentação humana. A média da produção brasileira chegou a 11,6 milhões de toneladas nos últimos cinco anos, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor brasileiro, com produção média de 8 mil toneladas nesse período (CONAB, 2019).

As plantas daninhas são consideradas o principal fator limitante da produção do arroz (ANTIGUA et al., 1990). Um dos herbicidas amplamente utilizado no cultivo de arroz é o clomazone, cujo mecanismo de ação inibe a síntese de carotenoides e interfere negativamente na fotossíntese. O clomazone é tolerado pela cultura do arroz até determinadas doses, dependendo do tipo de solo onde é aplicado (SANCHOTENE et al., 2010). Porém, para controlar as principais gramíneas competidoras do arroz são necessárias doses superiores às usualmente aplicadas durante o ciclo da cultura, sendo que estas podem provocar fitotoxicidade no arroz, interferindo negativamente no desenvolvimento das plântulas pós-germinação e na emissão de perfilhos.

Desta forma, é amplamente utilizado o dietholate como protetor de sementes, buscando reduzir os efeitos fitotóxicos do clomazone sobre plântulas quando aplicados em doses acima da tolerada pela cultura (FERHATOGLU et al., 2005). Este protetor é um organofosforado que inibe a enzima citocromo P-450 mono-oxigenase, responsável por hidroxilar o clomazone no citoplasma celular, transformando-o na forma tóxica para o vegetal (SANCHOTENE et al., 2010). Entretanto, essa enzima, nas plantas, possui a função de detoxificação de certos compostos (YUN et al., 2005), e a inibição da mesma, pelo protetor dietholate, pode provocar uma inibição da ativação de enzimas antioxidantes como a superóxido dismutase (SOD), peroxidases (POD) e a catalase (CAT), que são importantes na desintoxicação celular do excesso de espécies reativas de oxigênio (EROs), que são produzidas durante estresses bióticos e abióticos, causando deterioração dos fotossistemas, peroxidação de lipídeos, rompimento de membranas e extravasamento do conteúdo celular, dentre outros, conduzindo a célula ao colapso e à morte (SILVA et al., 2019).

Pesquisas têm evidenciado que estes efeitos deletérios causados pelo dietholate podem ser desencadeados por déficit hídrico (MAUAD et al., 2011). Para reduzir estes efeitos, têm sido utilizados produtos formulados contendo alguns minerais essenciais e fitohormônios, chamados de bioestimulantes (INOUE et al., 2012). O sucesso destes bioestimulantes, preconizados como possíveis reguladores da atividade metabólica em plantas, normalmente

deve-se a elementos minerais como o silício (Si) (MAUAD et al., 2011) que é um estimulador enzimático (TAIZ et al., 2017) e pode interferir no crescimento e no desenvolvimento de plantas ao promover sinalização para produção de compostos antioxidantes (ETESAMI et al., 2017) e compostos osmoprotetores, tais como a prolina e a glicina-betaína (ETESAMI et al., 2017). A glicina-betaína protege as membranas dos tilacóides, mantendo a eficiência fotoquímica na fotossíntese (ASHRAF; FOOLAD, 2007). A prolina atua na estabilização de proteínas e na proteção das membranas contra os efeitos deletérios das EROs (SHARMA e DUBEY, 2005).

Não há estudos conclusivos sobre a eficácia dos bioestimulantes em mitigar os estresses provocados pelo uso do dietholate, correlacionados ou não por déficits hídricos. A deficiência hídrica é um importante estresse ambiental que afeta negativamente o crescimento e a produtividade de plantas. Desta forma, objetivou-se avaliar os possíveis efeitos do Si como atenuador de estresse por déficit hídrico em sementes de arroz tratadas com dietholate.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação com 6 m x 20 m e 5 m de pé direito, durante o período de fevereiro à abril de 2018. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, e os tratamentos com três repetições, arranjos em esquema fatorial 3x2x4x2: três condições hídricas do solo (50%, 100% da capacidade de retenção de água no solo (CRA) e lâmina d'água de 5,0 cm), duas cultivares (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), quatro doses de Si sobre o sulco de semeadura (0; 4,0; 8,0 e 16 g L⁻¹) e duas fontes de Si (metassilicato de sódio (composição: Na₂O ≅ 28%; SiO₂ ≅ 27%; Fe ≅ 0,02%) e metassilicato de potássio (composição: N ≅ 3%; P₂O₅ ≅ 2%; K₂O ≅ 15%; SiO₂ ≅ 25%)).

As unidades experimentais foram vasos com 500 gramas de solo *argissolo vermelho-amarelo distrófico arênico*. A adubação de base, com macronutrientes NPK e micronutrientes foi em pré-semeadura, baseada no resultado da análise química do solo. Em cada unidade experimental foram semeadas 10 sementes, na profundidade de dois centímetros, tratadas com o protetor de sementes dietholate (Permit Star®) na dose de 6 mL por kg de sementes, sendo mantidas 6 plântulas mais uniformes por vaso, após a emergência.

Para manter as condições hídricas de 50% e 100% da capacidade de retenção de água no solo (CRA) e as irrigações diárias, foi utilizado o método descrito por Spatt (2018). Os tratamentos referentes à condição hídrica do solo iniciaram 15 dias após a semeadura, simulando a condição de entrada d'água na lavoura de arroz irrigado. As avaliações das

variáveis fisiológicas e morfológicas das plantas de arroz foram realizadas quando as mesmas encontravam-se no estágio fenológico vegetativo V10.

A peroxidação de lipídios da parte aérea foi avaliada pelo método de El-Moshaty et al. (1993) e para a determinação da atividade da enzima guaiacol peroxidase (POD) utilizou-se o método de Zeraik et al. (2008), e para a enzima superóxido dismutase (SOD) o método espectrofotométrico descrito por Giannopolitis e Ries (1977).

A avaliação da clorofila *a* e *b* foi realizada pelo ClorofiLOG[®] da Falker no terço médio da quarta folha de três plantas por tratamento e a área foliar (cm²), o equipamento AM350 da ADC BioScientific. Para avaliação da massa seca das plantas, três plantas foram retiradas por vaso e colocadas em sacos de papel poroso, em estufa com secagem por ar forçado à temperatura de 65° C, até que se atingiu massa seca (g) constante.

Procedeu-se à análise de variância para as variáveis respostas, sendo os fatores analisados pelo teste de Tukey em nível de 0,05 de probabilidade de erro, exceto as doses de silício que foram ajustados modelos polinomiais, utilizando-se o programa estatístico Sisvar[®] 5.3 (FERREIRA, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As variáveis massa seca da parte aérea e de raiz apresentaram interação significativa para todos os fatores (condição hídrica do solo x cultivar x dose de silício x fonte de Si). A variável peroxidação de lipídios mostrou interação entre condição hídrica do solo x cultivar x dose de Si, não havendo efeito das fontes de Si pelo teste F ($p < 0,05$), assim, para essa variável, os modelos de regressão e tabelas foram obtidos com a média das duas fontes. Para as variáveis atividade da enzima peroxidase (POD) e área foliar, houve interação entre dose de Si e condição hídrica do solo, não havendo efeito de cultivar e de fontes de Si pelo teste F ($p < 0,05$), assim, para essas variáveis, os modelos de regressão e tabelas foram organizados com a média das duas cultivares e das duas fontes. As variáveis índice de clorofila *a* e *b* apresentaram interações entre condição hídrica do solo x dose de silício Si x fontes de Si, não havendo efeito de cultivar pelo teste F ($p < 0,05$), assim, os modelos de regressão e tabelas foram obtidos com a média das duas cultivares. Para a variável atividade da enzima superóxido dismutase (SOD), houve efeito significativo apenas para a dose de Si, não havendo efeito de cultivar, fontes de Si e condição hídrica do solo pelo teste F ($p < 0,05$), assim, os modelos de regressão foram obtidos com a média das cultivar, fontes de Si e condição hídrica do solo.

De modo geral, a variável massa seca da parte aérea foi maior em lâmina d'água, condição ideal para o desenvolvimento das plantas de arroz (ISMAIL et al., 2012). Cabe ressaltar que o Si influenciou de forma positiva na massa seca da parte aérea das plantas de arroz sob as três condições hídricas do solo, incrementando a massa seca das duas cultivares (Tabela 1). Lee et al. (2010) relatam que o Si promove incremento do crescimento por potencializar a absorção de nutrientes minerais, possivelmente pelo relacionamento cinético com o processo de absorção de alguns nutrientes.

Tabela 1 – Médias da massa seca da parte aérea e raiz de plantas de arroz, sob diferentes doses de Si e cultivares para os fatores fontes de Si e condições hídricas. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SI	CULTIVAR	FONTE DE SI	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO					
			Massa seca da parte aérea			Massa seca de raiz		
			50 % CRA	100 % CRA	Lamina d'água	50 % CRA	100 % CRA	Lamina d'água
0 g L ⁻¹	Guri INTA CL	Metassilicato de potássio						
		Metassilicato de sódio	0,26 b	0,47 b	0,69 a	0,19 b	0,22 b	0,60 a
	IRGA 424RI	Metassilicato de potássio	0,30 b	0,40 b	0,67 a	0,13 a	0,20 a	0,24 a
		Metassilicato de sódio						
4,0 g L ⁻¹	Guri INTA CL	Metassilicato de potássio	0,36 Ab	0,51 Ab	0,79 Aa	0,11 Ab	0,16 Ab	0,45 Aa
		Metassilicato de sódio	0,46 Ab	0,61 Ab	0,9 Aa	0,27 Ab	0,30 Ab	0,59 Aa
	IRGA 424RI	Metassilicato de potássio	0,36 Ab	0,46 Aab	0,63 Ba	0,18 Aa	0,31 Aa	0,34 Ba
		Metassilicato de sódio	0,39 Ab	0,46 Ab	0,83 Aa	0,17 Ab	0,34 Ab	1,18 Aa
8,0 g L ⁻¹	Guri INTA CL	Metassilicato de potássio	0,43 Ab	0,58 Aab	0,76 Aa	0,13 Ab	0,29 Ab	2,60 Aa
		Metassilicato de sódio	0,53 Ab	0,66 Ab	0,93 Aa	0,26 Ab	0,29 Ab	1,99 Ba
	IRGA 424RI	Metassilicato de potássio	0,44 Ba	0,53 Aa	0,65 Aa	0,21 Ac	0,41 Ab	0,68 Ba
		Metassilicato de sódio	0,80 Aa	0,69 Aa	0,76 Aa	0,19 Ab	0,30 Ab	1,71 Aa
16 g L ⁻¹	Guri INTA CL	Metassilicato de potássio	0,61 Ab	0,71 Aab	0,89 Ba	0,16 Ab	0,29 Ab	2,22 Aa
		Metassilicato de sódio	0,58 Ab	0,73 Ab	1,21 Aa	0,30 Ab	0,38 Ab	2,01 Ba
	IRGA 424RI	Metassilicato de potássio	0,50 Bb	0,84 Aa	1,04 Aa	0,32 Ab	0,50 Ab	1,03 Ba
		Metassilicato de sódio	0,85 Aa	0,82 Aa	0,96 Aa	0,24 Ab	0,24 Bb	2,14 Aa
			CV (%) = 17,73			CV (%) = 18,25		

*Médias não seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, diferem estatisticamente entre as fontes de Si, e mesma letra minúscula nas linhas difere entre as condições hídricas do solo, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). CRA: capacidade de retenção de água do solo.

As cultivares somente apresentaram diferença estatística, para a variável massa seca da parte aérea, sob condição hídrica do solo de 50% da CRA em 8,0 e 16 g L⁻¹ de metassilicato de sódio, com a cultivar IRGA 424 RI superando em média da massa seca da parte aérea da cultivar Guri INTA CL. Em contrapartida, sob condição hídrica do solo de Lâmina d'água, em dose de 16 g L⁻¹ de metassilicato de sódio, a cultivar Guri INTA CL obteve maior teor de massa seca da parte aérea (Tabela 2).

Tabela 2 - Médias da massa seca da parte aérea e raiz de plantas de arroz, sob diferentes condições hídricas, fontes e doses de Si para o fator cultivar. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SI	FONTE DE SI	CULTIVAR	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO					
			Massa Seca da Parte Aérea			Massa Seca de Raiz		
			50% CRA	100% CRA	Lamina d'água	50% CRA	100% CRA	Lamina d'água
0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,25 A	0,46 A	0,76 A	0,14 A	0,18 A	0,38 A
		IRGA 424RI	0,30 A	0,40 A	0,63 A	0,11 A	0,12 A	0,22 B
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,28 A	0,48 A	0,63 A	0,24 A	0,26 A	0,81 A
		IRGA 424RI	0,30 A	0,43 A	0,70 A	0,16 A	0,27 A	0,26 B
4,0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,37 A	0,51 A	0,79 A	0,11 A	0,16 A	0,59 B
		IRGA 424RI	0,36 A	0,46 A	0,63 A	0,18 A	0,31 A	1,19 A
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,46 A	0,61 A	0,83 A	0,27 A	0,31 A	0,45 A
		IRGA 424RI	0,39 A	0,46 A	0,90 A	0,18 A	0,34 A	0,34 A
8,0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,43 A	0,58 A	0,76 A	0,13 A	0,29 A	1,99 A
		IRGA 424RI	0,44 A	0,53 A	0,65 A	0,21 A	0,41 A	1,71 B
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,53 B	0,66 A	0,93 A	0,26 A	0,30 A	2,60 A
		IRGA 424RI	0,80 A	0,69 A	0,76 A	0,19 A	0,30 A	0,68 B
16,0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,61 A	0,71 A	0,89 A	0,16 A	0,29 B	2,01 A
		IRGA 424RI	0,50 A	0,84 A	1,04 A	0,32 A	0,50 A	2,14 A
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,58 B	0,73 A	1,21 A	0,30 A	0,38 A	2,22 A
		IRGA 424RI	0,85 A	0,82 A	0,96 B	0,24 A	0,25 A	1,03 B
			CV (%) = 17,73			CV (%) = 18,25		

*Médias não seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, diferem estatisticamente entre as cultivares, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). CRA: capacidade de retenção de água do solo.

Para a análise de regressão das doses de Si, na média de massa seca da parte aérea, observou-se que as duas cultivares foram influenciadas pelas doses de metassilicato de potássio. Na cultivar IRGA 424 RI, em condições hídricas do solo de 50, 100% e Lâmina d'água, a massa seca da parte aérea aumentou 66, 120 e 65% com a adição da maior dose de metassilicato de potássio (16 g L⁻¹) em relação às plantas não suplementadas com Si (0 g L⁻¹) (Tabela 3). Na cultivar Guri INTA CL, em condição hídrica de lâmina d'água, o aumento da massa seca não foi significativo para as doses de metassilicato de potássio (Tabela 3). Já em condição hídrica do solo de 50 e 100% da CRA, a massa seca da parte aérea aumentou 144 e 54% com a adição de 16 g L⁻¹ de metassilicato de potássio em relação às plantas não suplementadas com Si (0 g L⁻¹) (Tabela 3). Para a matéria seca da parte aérea das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL, sob condição hídrica do solo de 50, 100% da CRA e Lâmina d'água, a dose 16 g L⁻¹ de metassilicato de sódio proporcionou um aumento dos teores de

massa seca de 166, 86 e 43% na cultivar IRGA 424 RI e 107, 52 e 92% para cultivar Guri INTA CL, respectivamente em relação às plantas não suplementadas com Si (0 g L^{-1}) (Tabela 3).

Tabela 3 – Relação entre a concentração da massa seca da parte aérea e de raiz, e a peroxidação lipídica da parte aérea das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, sob condições hídricas do solo e doses de Si de diferentes fontes. Santa Maria, RS, 2019.

CULTIVAR	FONTE DE SI	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO	EQUAÇÃO DA REGRESSÃO
			MASSA SECA DA PARTE AÉREA
IRGA 424RI	Metassilicato de Potássio	50% CRA	$y = 0,0126x + 0,312 \text{ R}^2 = 0,9537$
		100% CRA	$y = 0,0305x + 0,354 \text{ R}^2 = 0,9391$
		Lâmina d'água	$y = 0,0265x + 0,552 \text{ R}^2 = 0,804$
Guri INTA CL	Metassilicato de Potássio	50% CRA	$y = 0,0221x + 0,258 \text{ R}^2 = 0,996$
		100% CRA	$y = 0,0159x + 0,454 \text{ R}^2 = 0,9972$
		Lâmina d'água	y= ns
IRGA 424RI	Metassilicato de Sódio	50% CRA	$y = 0,037x + 0,326 \text{ R}^2 = 0,8132$
		100% CRA	$y = 0,0262x + 0,4184 \text{ R}^2 = 0,9269$
		Lâmina d'água	$y = 0,017x + 0,706 \text{ R}^2 = 0,8207$
Guri INTA CL	Metassilicato de Sódio	50% CRA	$y = 0,0172x + 0,342 \text{ R}^2 = 0,8028$
		100% CRA	$y = 0,0144x + 0,524 \text{ R}^2 = 0,8547$
		Lâmina d'água	$y = 0,0336x + 0,682 \text{ R}^2 = 0,9394$
			MASSA SECA DE RAIZ
IRGA 424RI	Metassilicato de Potássio	50% CRA	$y = 0,012x + 0,126 \text{ R}^2 = 0,9786$
		100% CRA	$y = 0,0222x + 0,182 \text{ R}^2 = 0,8715$
		Lâmina d'água	$y = 0,0489x + 0,23 \text{ R}^2 = 0,9623$
Guri INTA CL	Metassilicato de Potássio	50% CRA	y= ns
		100% CRA	y=ns
		Lâmina d'água	$y = -0,0083x^2 + 0,2484x + 0,477 \text{ R}^2 = 0,59$
IRGA 424RI	Metassilicato de Sódio	50% CRA	y= ns
		100% CRA	y=ns
		Lâmina d'água	$y = -0,0088x^2 + 0,2592x + 0,2402 \text{ R}^2 = 0,9976$
Guri INTA CL	Metassilicato de Sódio	50% CRA	y= ns
		100% CRA	y=ns
		Lâmina d'água	$y = -0,0078x^2 + 0,2408x + 0,216 \text{ R}^2 = 0,8391$
			PEROXIDAÇÃO LIPÍDICA DA PARTE AÉREA
IRGA 424RI	Metassilicato de Potássio	50% CRA	$y = 0,0003x^2 - 0,0082x + 0,0465 \text{ R}^2 = 0,8935$
		100% CRA	y= ns
		Lâmina d'água	Y=ns
Guri INTA CL	Metassilicato de Potássio	50% CRA	$y = 0,0005x^2 - 0,012x + 0,0672 \text{ R}^2 = 0,9627$
		100% CRA	y= ns
		Lâmina d'água	y= ns
IRGA 424RI	Metassilicato de Sódio	50% CRA	$y = 0,0004x^2 - 0,0087x + 0,0413 \text{ R}^2 = 0,9269$
		100% CRA	y= ns
		Lâmina d'água	y=ns
Guri INTA CL	Metassilicato de Sódio	50% CRA	y= ns
		100% CRA	$y = -0,0008x + 0,016 \text{ R}^2 = 0,7604$
		Lâmina d'água	y= ns

*ns = não houve ajuste significativo para modelos polinomiais.

O Si influenciou no ganho de massa seca da parte aérea em todos os regimes hídricos e, apesar da restrição hídrica ter prejudicado o crescimento do arroz em alguns parâmetros, o Si melhorou os processos fisiológicos de crescimento da cultura, corroborando com Lima et al. (2011). De acordo com Habibi et al. (2014), ao verificarem as implicações da aplicação de Si sobre algumas características fisiológicas de plantas de canola (*Brassica napus* L. cv. Okapi) constataram que plantas cultivadas sob estresse hídrico por 25 dias tratadas com Si,

exibiram maior massa seca da parte aérea e de raiz, taxa de crescimento relativo, taxa de assimilação e teor relativo de água, em comparação com aquelas sem Si sob as mesmas condições de estresse hídrico. Em plantas suplementadas com Si e em déficit hídrico, a quantidade de malondialdeído (MDA) manteve-se inalterada após 25 dias de estresse hídrico, devido à maior atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) e peroxidase (POD). Em contrapartida, Mauad et al. (2011) avaliando a massa seca da parte aérea, em duas cultivares de arroz de terras altas, sob condições de déficit hídrico induzido e aplicação de Si como mitigador, verificaram que o Si não influenciou na massa seca acumulada. Entretanto, as plantas tratadas com Si suportaram por maior período o déficit hídrico em relação às não tratadas. Melo et al. (2003), estudando o efeito da aplicação de Si sobre a produção de matéria seca de duas espécies do gênero *Brachiaria*, em condições de diferentes regimes hídricos no solo observaram que, apesar de as plantas terem acumulado altas quantidades de Si na parte aérea, a tolerância de ambas ao déficit hídrico não foi evidenciada na presença do elemento.

A variável massa seca de raiz em relação as fontes de Si, no geral, não apresentaram diferenças em condições hídricas do solo de 50 e 100% da CRA para as duas fontes de Si. Para a condição hídrica do solo de lâmina d'água a fonte metassilicato de sódio proporcionou maior massa seca de raiz na cultivar IRGA 424RI, enquanto que, a cultivar Guri INTA CL apresentou maior massa seca de raiz com a fonte metassilicato de potássio (Tabela 1).

Em relação às condições hídricas do solo, é possível observar que sob déficit hídrico (50% da CRA) o teor de massa seca de raiz diminuiu significativamente em relação à lâmina d'água (condição ideal) (Tabela 1).

Entre as cultivares, verificou-se que, de modo geral, só houve diferença significativa no teor de massa seca de raiz sob condição hídrica do solo de lâmina d'água. Dos oito tratamentos em combinação para a lâmina d'água, 62% apresentaram maior teor de massa seca de raiz para a cultivar Guri INTA CL em relação a cultivar IRGA 424 RI (Tabela 2). Segundo Ma et al. (2007) diferenças genotípicas na acumulação de Si em plantas de arroz podem estar relacionadas na diferença da expressão de genes transportadores de Si nas raízes.

Na análise de regressão das doses de Si para as médias da massa seca de raiz, verifica-se que na cultivar IRGA 424 RI, o aumento das doses de metassilicato de potássio proporcionou um aumento linear do teor de massa seca nas três condições hídricas do solo de 50 e 100% da CRA e lâmina d'água, com um incremento respectivamente de 166, 316 e 296%, na maior dose (16 g L^{-1}) em relação às plantas não suplementadas com Si (0 g L^{-1}) (Tabela 3). Já para as doses de metassilicato de sódio, na IRGA 424 RI, existe uma relação quadrática sob condição hídrica do solo de lâmina d'água, com ponto de máxima na dose 12,5

g L^{-1} . Nas demais condições hídricas do solo, nenhum polinômio foi significativo (Tabela 3). Para a cultivar Guri INTA CL, sob condição hídrica do solo de lâmina d'água, o aumento nas doses das duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio) incrementou de forma quadrática o teor de massa seca de raiz, com pontos de máximo nas doses de 16 e 15 g L^{-1} de metassilicato sódio e de metassilicato de potássio, respectivamente. As demais condições hídricas do solo não tiveram ajustes significativos de modelos polinomiais (Tabela 3).

Corroborando com Faria Junior et al. (2009), que verificaram aumento de massa seca de raiz com o aumento das doses de Si, nas cultivares Conai e Curinga. Hattori et al. (2005) observaram que sob condições de seca, as plantas de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) que receberam Si, apresentaram melhorias do crescimento radicular, comparadas com plantas cultivadas sem Si. Sávio et al. (2011) observaram que nas espécies *Brachiaria brizantha* e *Panicum máximum* houve efeito positivo do Si na produção de massa seca.

Em relação à média da área foliar nas diferentes condições hídricas, quanto maior foi a disponibilidade hídrica do solo (lâmina d'água) maior foi a área foliar das plantas de arroz para as duas cultivares e fontes, independente do fator dose de Si (Tabela 4). O crescimento em plantas é iniciado primeiramente pela multiplicação de células meristemáticas e, subsequente alongamento destas e a água desempenha um importante papel neste alongamento celular proporcionada pela pressão de turgor (WOODRUFF et al., 2011). Por isso, o estresse hídrico reduz o crescimento de plantas e prejudica o rendimento das culturas (BOYER, 1982).

Tabela 4 – Médias da área foliar de plantas de arroz, sob diferentes doses de Si para o fator condições hídricas do solo. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SI	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO		
	50% CRA	100% CRA	Lâmina d'água
0 g L^{-1}	7,43 c	17,28 b	30,70 a
4,0 g L^{-1}	7,69 c	19,69 b	35,48 a
8,0 g L^{-1}	9,16 c	22,03 b	41,22 a
16 g L^{-1}	13,48 c	24,48 b	46,44 a
CV (%) = 22,01			

*Médias não seguidas de mesma letra na linha, diferem estatisticamente entre as condições hídricas do solo pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). CRA: capacidade de retenção de água do solo.

Na análise de regressão das doses de Si na área foliar, nas três condições hídricas do solo (50 e 100% da CRA e lâmina d'água) houve aumento linear da área foliar associado ao aumento das doses de Si, com incremento de 81% em 50% da CRA ($Y=0,3951x + 6,682$; $R^2=0,932$), 39% em 100% CRA ($Y=0,4168x + 17,85$; $R^2= 0,949$) e de 51% na condição

hídrica do solo de lâmina d'água ($Y = 0,9841x + 31,574$; $R^2 = 0,966$) na maior dose de Si (16 g L^{-1}) em relação às plantas sem Si (0 g L^{-1}), demonstrando a ação benéfica do Si, ainda que em condições de déficit hídrico (50% CRA). Possivelmente, este efeito ocorre pelo Si aumentar o teor relativo de água na folha, proporcionando maior pressão de turgor nas células, favorecendo a expansão celular e proporcionando maior área foliar, corroborando com os resultados de Kim et al. (2012).

Em relação à média do índice de clorofila *a* e *b*, nas diferentes condições hídricas e fontes de Si, de modo geral, o índice de clorofila foi maior nas plantas sob condição de lâmina d'água, possivelmente pela maior produção dos pigmentos ou menor degradação. Não houve diferença significativa, de modo geral, entre as fontes de Si para os índices de clorofila *a* e *b* (Tabela 5).

Tabela 5 – Médias do índice de clorofila *a* e *b* na parte aérea de plantas de arroz sob diferentes doses e fontes de Si para o fator condições hídricas do solo. Santa Maria, RS, 2019.

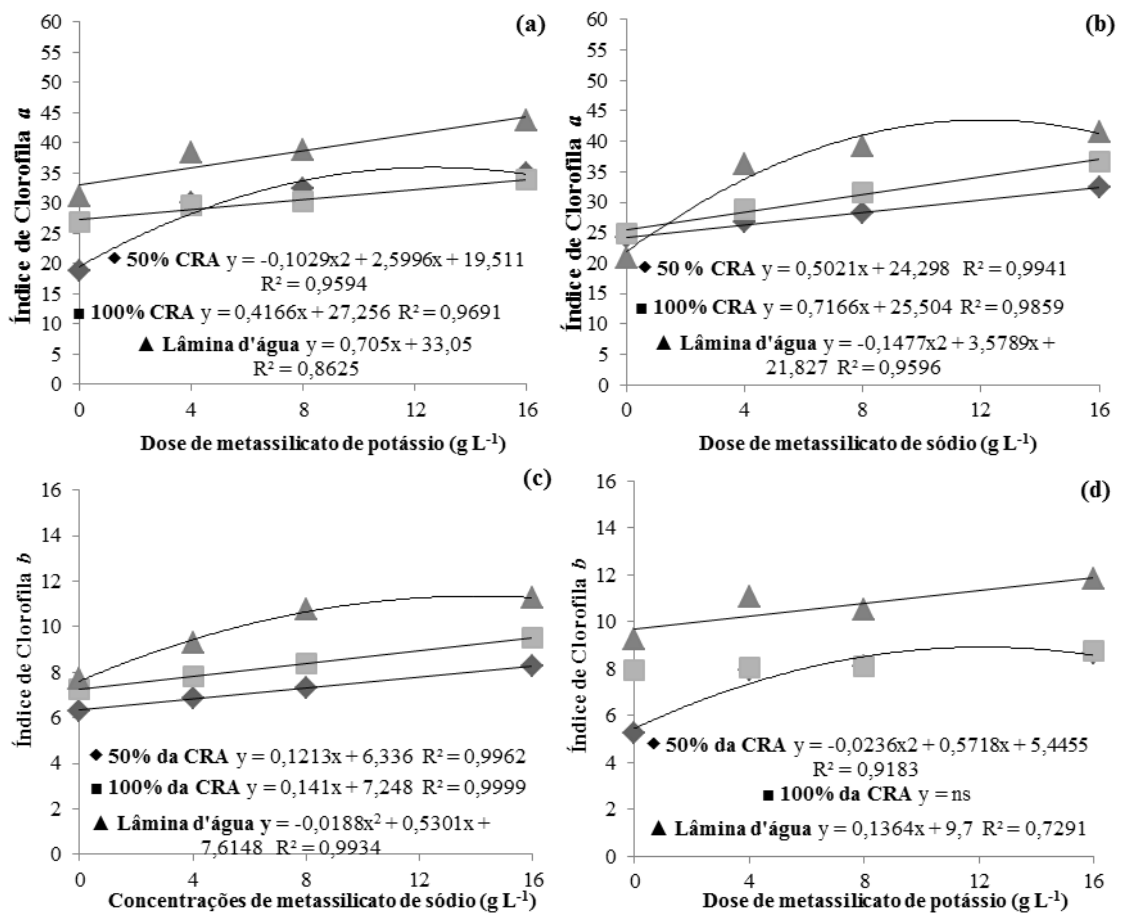
DOSE DE SI	FONTE DE SI	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO		
		50 % CRA	100 % CRA	Lâmina d'água
ÍNDICE DE CLOROFILA <i>a</i>				
0 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio Metassilicato de potássio	21,45 a	25,9 a	25,97 a
4,0 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio	26,68 Ab	28,91 Ab	36,25 Aa
	Metassilicato de potássio	30,16 Ab	29,63 Ab	38,43 Aa
8,0 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio	28,13 Bb	31,68 Ab	39,15 Aa
	Metassilicato de potássio	32,30 Aab	30,18 Ab	38,85 Aa
16 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio	32,33 Ab	36,62 Aab	41,58 Aa
	Metassilicato de potássio	35,00 Ab	33,95 Ab	43,61 Aa
CV (%) = 16,54				
ÍNDICE DE CLOROFILA <i>b</i>				
0 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio Metassilicato de potássio	5,71 b	7,58 ab	8,46 a
4,0 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio	6,88 Ab	7,80 Ab	9,26 Ba
	Metassilicato de potássio	7,93 Ab	8,05 Ab	11,06 Aa
8,0 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio	7,33 Ab	8,37 Ab	10,78 Aa
	Metassilicato de potássio	8,08 Ab	8,11 Ab	10,50 Aa
16 g L ⁻¹	Metassilicato de sódio	8,25 Ab	9,51 Ab	11,25 Aa
	Metassilicato de potássio	8,63 Ab	8,74 Ab	11,83 Aa
CV (%) = 11,13				

*Médias de fontes de Si não seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, diferem estatisticamente, e mesma letra minúscula nas linhas diferem entre as condições hídricas do solo, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). CRA: capacidade de retenção de água do solo.

A análise de regressão entre doses de Si e o índice de clorofila *a*, para a fonte metassilicato de potássio, demonstrou, que a maior dose (16 g L^{-1}) proporcionou um incremento linear de 26 e 40% no índice de clorofila *a* das plantas sob condição hídrica do solo de 100% da CRA e lâmina d'água respectivamente, em relação às plantas não suplementadas com Si (0 g L^{-1}). Sob condição hídrica do solo de 50% da CRA, houve um aumento quadrático no índice de clorofila *a*, com ponto de máxima na dose 13 g L^{-1} de

metassilicato de potássio (Figura 1a). Para a fonte metassilicato de sódio, sob condição hídrica do solo de 50 e 100% da CRA, as plantas apresentaram um incremento de 30 e 47% do índice de clorofila *a* respectivamente, na dose de 16 g L⁻¹ em relação às plantas não suplementadas com Si (0 g L⁻¹). Já em condição hídrica do solo de lâmina d'água, obteve-se um aumento quadrático, com ponto de máxima na dose 13 g L⁻¹ de metassilicato de sódio (Figura 1b).

Figura 1 – Relação entre a concentração do índice de clorofila *a* e *b* das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, sob condições hídricas do solo e doses de Si de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.



A análise de regressão entre as doses de Si e o índice de clorofila *b*, na fonte de metassilicato de sódio, é de efeito linear direto nas condições hídricas de 50 e 100% da CRA e de forma quadrática para a condição lâmina d'água, com ponto de máxima na dose 12,5 g L⁻¹ (Figura 1c). Os teores de clorofila *b* para a fonte metassilicato de potássio aumentaram de forma linear para a condição hídrica lâmina d'água, e de forma quadrática para 50% da CRA, com ponto de máxima na dose 12,4 g L⁻¹. Em 100% da CRA, não teve ajuste significativo de modelos polinomiais (Figura 1d).

Ressalta-se que os teores de clorofila *a* e *b* aumentaram nas três condições hídricas com a adição de Si, possivelmente, pelo fato do Si ser um indutor de aumento de pigmentos (GONG et al., 2005; SOUZA, 2008). Além disso, o Si está relacionado com ajustes na ultraestrutura de cloroplastos, sendo benéfico para a manutenção dos conteúdos de clorofila (AHMED et al., 2014). Neste trabalho, os resultados de conteúdo de pigmentos estão relacionados com a produção de biomassa, uma vez que plantas expostas ao Si apresentaram maior conteúdo de pigmentos, com maior potencial de absorver a energia luminosa e, conseqüentemente, produzir mais biomassa.

Na literatura não há consenso sobre a influência do Si nos teores de pigmentos fotossintéticos, o que pode estar relacionado às diferentes condições experimentais entre os trabalhos. Shen et al. (2010) verificaram que a aplicação de Si em folhas de soja sob déficit hídrico aumentou os teores de clorofilas nas plantas irrigadas, entretanto, esse tratamento não alterou os teores de clorofilas nas plantas não irrigadas. Todavia, Pei et al. (2010) observaram que a aplicação de Si em folhas de trigo promoveu aumento no teor de clorofilas somente nas plantas sob déficit hídrico, não diferindo entre plantas irrigadas. Já em plantas de morango (BRAGA et al., 2009) e arroz (ÁVILA et al., 2010), a suplementação do meio de cultura com Si proporcionou maior teor de clorofila.

Os teores de clorofila *a* foram maiores do que os da clorofila *b*. Esse resultado é comumente encontrado na maioria das plantas, uma vez que as clorofilas *b* fazem parte somente dos pigmentos antena, enquanto as clorofilas *a* fazem parte dos pigmentos antena e do centro de reação dos fotossistemas (TAIZ et al., 2017).

Segundo Hendry e Price (1993), a deficiência hídrica é um dos estresses ambientais responsáveis pela diminuição de pigmentos nas folhas, fazendo com que o ciclo de vida da planta seja alterado. Segundo Marques (2009), o estresse hídrico pode promover redução na fotossíntese líquida. Este efeito é geralmente associado a uma limitada capacidade de síntese e/ou maior degradação de clorofilas totais, clorofila *a* e clorofila *b*, indicando que sob estresse as plantas parecem necessitar de rotas alternativas de dissipação de energia a fim de evitar problemas de fotoinibição e fotoxidação.

Esse aumento dos níveis de clorofila em relação à aplicação de Si, segundo Agarie et al. (1998), está associado à prevenção do progresso da senescência foliar, devido à manutenção da fotossíntese e proteção da destruição da clorofila, principalmente em condições de altas temperaturas e baixa umidade. A aplicação de Si em arroz sobre déficits hídricos aumenta o conteúdo de glicolípídeos e fosfolípídeos, o que estaria relacionado ao incremento do conteúdo de clorofila e a maior estabilidade e funcionamento da membrana

plasmática (WANG; GALLETTA, 1998).

Em relação à peroxidação de lipídios da parte aérea, nas diferentes condições hídricas e cultivares (Tabela 6), houve diferenças entre as condições hídricas do solo quando a planta não foi suplementada com Si, com maior peroxidação de lipídios em condições de déficit hídrico (50% da CRA) ou com 100% da CRA. Em contra partida, quando as plantas foram suplementadas com Si, em diferentes fontes e doses, não houve diferença significativa entre os valores de peroxidação de lipídeos da parte aérea nas três condições hídricas do solo, ou seja, o Si atuou possivelmente como indutor da redução da peroxidação de lipídios independente da cultivar ou da dose aplicada. Esse resultado pode ter relação com a atividade da POD, pois o Si promove um aumento na atividade desta enzima em condições de déficit hídrico (50% da CRA) ou com 100% da CRA.

Em relação às cultivares, a maior peroxidação de lipídeos ocorreu na Guri INTA CL, sob condição hídrica do solo de 50% da CRA, quando não houve suplementação com Si, entretanto, quando foi aplicado Si, não houve diferença significativa entre as cultivares (Tabela 6), indicando ação do Si muito semelhante em ambas cultivares, possivelmente, devido a semelhança genética entre elas.

O Si é um dos elementos minerais que é citado como protetor ao estresse por déficit hídrico (GONG et al., 2005) em função de estimular a sinalização para produção de compostos osmoprotetores, tais como prolina e glicina-betaína (ETESAMI et al., 2017). A glicina betaína, a qual possui alta afinidade pela água (LOBATO et al., 2009), protege as membranas dos tilacóides, o que mantém a eficiência fotoquímica na fotossíntese. A prolina, como aminoácido e antioxidante não enzimático (ASHRAF; FOOLAD, 2007) atua, principalmente na osmoproteção (CAYLEY et al., 1992), na estabilização de proteínas e na proteção das membranas contra os efeitos deletérios das EROs (SHARMA e DUBEY, 2005). Essas moléculas são consideradas osmólitos chave para o ajuste osmótico de plantas em condições de estresse hídrico (NAYYAR, 2003).

Sugere-se que a suplementação com Si em plantas cultivadas sob déficit hídrico alivia os efeitos negativos da falta de água devido ao seu reforço da eficiência fotoquímica e a troca gasosa fotossintética, bem como, uma ativação da capacidade de defesas antioxidantes, proporcionando uma atenuação da peroxidação de lipídios.

Tabela 6 – Médias da peroxidação de lipídios em parte aérea de arroz, sob diferentes doses de Si e cultivares para o fator condição hídrica. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SI	FONTE DE SI	CULTIVAR	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO		
			50 % CRA	100 % CRA	Lamina d'água
0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,0700 Aa	0,010 Bb	0,0100 Ab
		IRGA 424RI	0,0500 Ba	0,040 Aa	0,0100 Ab
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,0170 Ba	0,200 Ab	0,0130 Ab
		IRGA 424RI	0,0400 Aa	0,0170 Aa	0,0170 Aa
4,0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,0200 Aa	0,0100 Aa	0,0100 Aa
		IRGA 424RI	0,0100 Aa	0,0130 Aa	0,0100 Aa
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,0100 Aa	0,0100 Aa	0,0130 Aa
		IRGA 424RI	0,0033 Aa	0,0100 Aa	0,0100 Aa
8,0 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,0100 Aa	0,0100 Aa	0,0133 Aa
		IRGA 424RI	0,0100 Aa	0,1000 Aa	0,0067 Aa
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,0033 Aa	0,0070 Aa	0,0100 Aa
		IRGA 424RI	0,0000 Aa	0,0100 Aa	0,0067 Aa
16 g L ⁻¹	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,0067 Aa	0,0066 Aa	0,0067 Aa
		IRGA 424RI	0,0033 Aa	0,0066 Aa	0,0067 Aa
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,0033 Aa	0,0030 Aa	0,0030 Aa
		IRGA 424RI	0,0000 Aa	0,0067 Aa	0,0070 Aa
CV (%) = 75,42					

*Médias não seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, diferem estatisticamente entre as cultivares e mesma letra minúscula nas linhas entre as condições hídricas do solo, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). CRA: capacidade de retenção de água do solo.

Na análise de regressão entre as doses de Si e a peroxidação de lipídios da parte aérea, as cultivares de arroz IRGA 424 RI e Guri INTA CL, nas doses de metassilicato de potássio, apresentaram uma diminuição da peroxidação lipídica apenas na condição hídrica do solo de 50% da CRA, ajustando um modelo polinomial quadrático, com uma diminuição da peroxidação lipídica à medida que as doses de metassilicato de sódio aumentaram, tendo seus pontos de mínima nas doses 13 e 12 g L⁻¹ respectivamente (Tabela 3). A condição hídrica do solo de 100% da CRA e a lâmina d'água não obtiveram ajustes significativos de modelos polinomiais (Tabela 3). Para as doses de metassilicato de sódio, na cultivar IRGA 424 RI sob condição hídrica do solo de 50% da CRA, o aumento das doses proporcionou uma diminuição da peroxidação lipídica de forma quadrática negativa, tendo seu ponto de mínima na dose 11 g L⁻¹. A condição hídrica do solo de 100% da CRA e a lâmina d'água, não obtiveram ajustes significativos de modelos polinomiais. Já para a cultivar Guri INTA CL sob condição hídrica do solo de 100% da CRA, com a adição de Si na fonte metassilicato de sódio, apresentou um comportamento linear negativo, com diminuição da peroxidação lipídica à medida que as doses de metassilicato de sódio aumentaram. As condições hídricas de 50% da CRA e a lâmina d'água não apresentaram ajustes significativos de modelos polinomiais (Tabela 3).

Esses resultados demonstram que a presença de Si ocasionou uma redução significativa na peroxidação de lipídios da parte aérea de plantas de arroz sob déficit hídrico. Isso pode ser um indicativo de que o dano provocado pelas EROs sob déficit hídrico foi amenizado pela adição de Si, em parte, devido ao aumento da atividade da POD e SOD.

Portanto, tais resultados sugerem que a aplicação de Si pode efetivamente aumentar a capacidade de defesa das plantas de arroz contra o estresse oxidativo induzido pelo estresse hídrico (Tabela 3). SHI et al. (2005) observaram que o Si promoveu uma redução na peroxidação de lipídios de membrana via estimulação de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos.

Em relação às médias da atividade da enzima POD, nas diferentes condições hídricas do solo, é possível observar que a atividade da enzima foi maior em condição hídrica do solo de 50% da CRA. As doses mais altas de Si (8,0 e 16 g L⁻¹) proporcionaram um aumento na atividade da POD sob estresse hídrico (50% da CRA) ou com 100% da CRA quando comparado às condições de lâmina d'água (Tabela 7). Esse resultado sugere que o aumento na atividade da enzima POD induzida pela adição de Si pode proteger os tecidos vegetais de dano oxidativo sob estresse hídrico, o qual pode contribuir significativamente com o aumento na tolerância à seca.

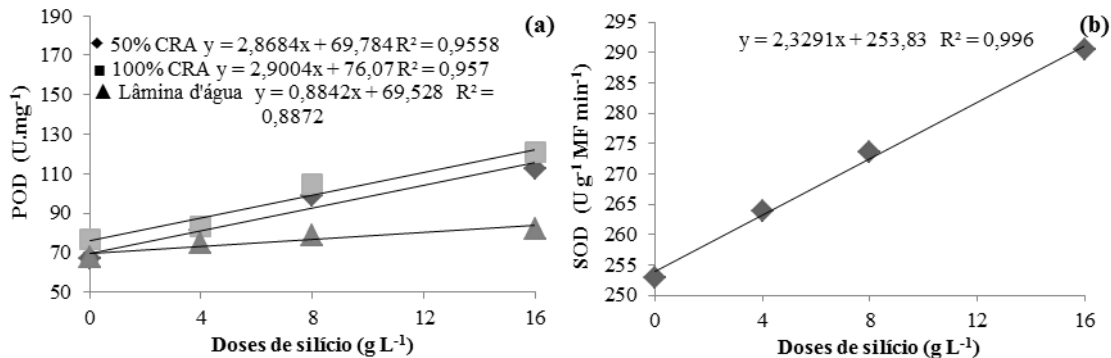
Tabela 7 – Médias da atividade enzimática da guaiacol peroxidase (POD) em parte aérea de arroz, sob diferentes doses de Si para o fator condições hídricas. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SI	CONDIÇÃO HÍDRICA DO SOLO		
	50 % CRA	100% CRA	Lâmina d'água
0 g L ⁻¹	66,67 a	76,69 a	67,32 a
4,0 g L ⁻¹	81,49 a	83,20 a	74,57 a
8,0 g L ⁻¹	98,61 a	104,74 a	78,76 b
16 g L ⁻¹	112,68 a	120,86 a	82,21 b
	CV (%)= 17,78		

*Médias não seguidas de mesma letra na linha diferem estatisticamente sob as diferentes condições hídricas do solo, pelo teste Tukey (p≤0,05). CRA: capacidade de retenção de água do solo.

Na análise de regressão entre as doses de Si e a atividade da POD, verificou-se que a suplementação com Si na dose mais alta (16 g L⁻¹) proporcionou um aumento de 68, 57 e 22% da atividade da enzima, nas três condições hídricas do solo de 50 e 100% da CRA e lâmina d'água respectivamente, em relação as plantas que não foram suplementadas com Si (Figura 2a). É importante ressaltar que o Si tem o potencial de ativar o sistema antioxidante, independente da presença ou não do fator estressante.

Figura 2 – Relação da atividade enzimática da guaiacol peroxidase (POD), na parte aérea das plantas de arroz, sob condições hídricas do solo: 50 e 100% da CRA e lâmina d'água (a) e da atividade enzimática da superóxido dismutase (SOD) (b) com as doses de Si (média das fontes metassilicato de sódio e metassilicato de potássio e, das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL). Santa Maria, RS, 2019.



Verma et al. (2003) observaram aumento na atividade da POD em arroz quando submetidos a condições de estresse. A enzima POD apresenta função antioxidante em células vegetais expostas a condições de estresse. Estas enzimas, além de desempenharem importante papel na biossíntese da parede celular, catalisam a reação entre um agente redutor e o H₂O₂, para produzir um composto oxidado e água (IUBMB, 2007), ou seja, a POD está envolvida em remover o H₂O₂, o qual é o principal produto final produzido pela enzima superóxido dismutase (SOD).

Levando-se em consideração a média da atividade enzimática da SOD, é possível observar na análise de regressão, um aumento linear da atividade da enzima com o aumento das doses de Si, com um incremento de 15% na dose mais alta de Si (16 g L⁻¹) em relação as plantas sem suplementação com Si (0 g L⁻¹). Isso pode ser positivo quando é proposto mitigar efeito de estresse que envolva produção de EROs em cultivo de arroz (Figura 2b). O aumento na atividade de enzimas antioxidantes na presença de Si indica que o Si pode estar envolvido no aumento da expressão de genes relacionados à produção e ativação de enzimas antioxidantes (BIJU, FUENTES, GUPTA, 2017).

O aumento da atividade da SOD sob condições de estresse pode resultar em maior eficiência na eliminação de EROs (WANGA et al., 2005). Tais EROs provocam estresse oxidativo, o qual resulta, em última análise, em danos celulares que podem levar à morte da planta (SFALCIN, 2009). Schmidt et al. (1999) verificaram que o Si promoveu um aumento nos níveis de enzimas antioxidantes, sob condições de baixa umidade.

CONCLUSÃO

O Si atenua o estresse por déficit hídrico em sementes de arroz tratadas com dietholate, promovendo um aumento na atividade das enzimas SOD e POD e diminuindo os danos oxidativos causados pela restrição hídrica em nível celular.

REFERÊNCIAS

- AGARIE, S., HANAOKA, N., UENO, O., MIYAZAKI, A., KUBOTA, F., AGATA, W., KAUFMAN, P.B.. Effects of silicon on tolerance to water deficit and heat stress in rice plants (*Oryza sativa* L.), monitored by electrolyte leakage. *Plant Production Science*, 1998, v.1, n.1, p.96-103.
- AHMED, M., ASIF, M., HASSAN, F.U.. Augmenting drought tolerance in sorghum by silicon nutrition. *Acta Physiol. Plant*, 2014, 36 (2), 473–483.
- ANJUM, N.A., SOFO, A., SCOPA, A., ROYCHOUDHURY, A., GILL, S.S., IQBAL, M., LUKATKIN, A.S., PEREIRA, E., DUARTE, A.C., AHMAD, I. Lipids and proteins - major targets of oxidative modifications in abiotic stressed plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2015, v. 22, p. 4099–4121
- ANTIGUA, G., COLON, C., GARCIA, J.. Utilizacion del herbicida Arrozán en el control de malezas del arroz en Cuba. *Ciencia y Técnica en la Agricultura - Arroz, La Habana*, 1990, v.13, n.1/2, p.135-144.
- ASHRAF M., AKRAM N.A., AL-QURAINY F., FOOLAD M. R.. Drought Tolerance: Roles of Organic Osmolytes, Growth Regulators, and Mineral Nutrients, In: Donald L. Sparks, *Advances in Agronomy*, Burlington: *Academic Press*, 2011, v.111, p. 249-296. cap. 5.
- ASHRAF, M., FOOLAD, M.. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Exp. Bot.*, 2007, v. 59, p. 206-216.
- ÁVILA, F. W., BALIZA, D. P., FAQUIN, V., ARAÚJO, J. L., RAMOS, S. J.. Interação entre Si e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. *Revista Ciência Agronômica*, 2010, v.41, p.184-190.
- BEAUCHAMP, C., FRIDOVICH, I. Superoxide dismutase: improved assays and an assay applicable to acrylamide gels. *Anal Biochemistry*, 1971, v.8, n.44, p.276–287.
- BOYER, J. S.. Plant productivity and environment. *Science*, 1982, vol. 218, p. 443-448.
- BRAGA, F.T. ET al. Características anatômicas de mudas de morangueiro micropropagadas com diferentes fontes de Si. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2009, v. 44, p. 128-132.
- CAYLEY S., LEWIS B.A, RECORD J.R.. Origins of the osmoprotective properties of betaine and proline in *Escherichia coli* K-12. *J. Bacteriol* 175, 1992, p1586-1595.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acomp. safra bras. grãos*, v. 6 Safra 2018/19 - Sexto levantamento, Brasília, p. 1-69 março 2019.
- EL-MOSHATY, F.I.B., PIKE, S.M., NOVACKY, A.J., SEHGAL, O.P.. Lipid peroxidation and superoxide productions in cowpea (*Vigna unguiculata*) leaves infected with tobacco rings virus or southern bean mosaic virus. *Journal of Physiological and Molecular Plant Pathology*, 1993, v. 43, p. 109-119.

- ETESAMI, H., JEONG, B.R.. Review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 147, 2017, p.881-896.
- FARIA JÚNIOR, L. A., CARVALHO, J. G., PINHO, P. J., BASTO, A.R.R., FERREIRA, E.V.O.. Produção de matéria seca, teor e acúmulo de Si em cultivares de arroz sob doses de Si. *Ciência e Agrotecnologia*, 2009, v. 33, n. 4, p. 1034-1040.
- FERREIRA, D.F., 2014. Sisvar: A guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, v.38, n.2, p.109-112.
- FERHATOGLU, Y., AVDIUSHKO, S., BARRET, M.. The basic for safening of clomazone by phorate insecticide in cotton and inhibitors of cytochrome P450s. *Pestic. Biochem. Physiol.*, 2005, v. 81, n. 1, p. 59-70.
- GOMATHI, R., CHANDRAN, K.P.N., GURURAJA, R., RAKKIYAPPAN, P.. Effect of waterlogging in sugarcane and its management. *Sugarcane Breeding Institute (SBI-ICAR)*, Extension Pub. 2010, n. 185.
- GONG, H., ZHU, X., CHEN, K., WANG, S., ZHANG, C.. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, 2005, 169. p.313-321.
- GRATÃO P.L., POLLE A., LEA P.J., AZEVEDO R.A.. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, 2005, V. 32. p.481–494.
- HABIBI, G.. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2014, 61(6), 784–791.
- HATTORI, T., INANAGA, S., ARAKI, H., NA, P., MORITA, S., LUXOVÁ, M., LUX, A.. Application of silicon enhanced drought tolerance in Sorghum bicolor. *Physiologia Plantarum*, 2005, v.123, p.459–466.
- HENDRY, G.A.F., PRICE, A.H.. *Stress indicators: chlorophylls and carotenoids*. In: HENDRY, G.A.F.; GRIME J.P. (Eds.) *Methods in comparative plant ecology*. London : Chapman and Hall, 1993, p. 148-152.
- INOUE, M.H., ARAÚJO, T.D.C., MENDES, K.F., BEN, R., CONCIANI, P.A.. Eficiência do dietholate e bioestimulantes isolados e associados no tratamento de sementes de algodoeiro adensado com clomazone aplicado em pré-emergência. *Revista de Ciências Agro-ambientais*, 2012, V.10; n.2, p. 163-172, Alta Floresta.
- INOUE, M.H., CAVALCANTE, N.R., BEN, R., MENDES, K.F., POSSAMAI, A.N.S., DALLACRT, R.. Seletividade do clomazone em sementes de algodão tratadas com dietholate e acetato de zinco. *Semina*, 2014, V. 35, n.6, p.2905-2918.
- INTERNATIONAL UNION OF BIOCHEMISTRY AND MOLECULAR BIOLOGY. *Enzyme nomenclature – EC 1.11.1.7. (Peroxidase)*. Disponível em: Acesso em: 25 jun. 2007.

- ISMAIL, A. M., JOHNSON, D. E., ELLA, E. S., VERGARA, G. V., BALTAZAR, A. M.. Adaptation to flooding during emergence and seedling growth in rice and weeds, and implications for crop establishment. *AoB PLANTS: PART OF A SPECIAL ISSUE ENTITLED 'FLOODING STRESS'*, v. 2012.
- KIM, YOON-HA ET AL.. Silicon treatment to rice (*Oryza sativa* L. cv. 'Gopumbyeo') plants during different growth periods and its effects on growth and grain yield. *Pakistan Journal of Botany*, 2012, 44. 891-897.
- YUN, M. S. ET AL.. Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). *Pestic. Biochem. Physiol.*, 2005, v. 83, n. 2-3, p. 107-114.
- LEE S.K., SOHN E.Y., HAMAYUN M., YOON J.Y., LEE I.J.. Effect of silicon on growth and salinity stress of soybean plant grown under hydroponic system. *Agroforestry Systems*, 2010, 80(3): 333-340.
- LI, J.C.; WEI, F.Z.; WANG, C.Y; YIN, J.. Effects of waterlogging on senescence of root system at booting stage in winter wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, v. 9, p. 1355-1360.
- LIMA, M.A., CASTRO, V.F., VIDAL, J.B., FILHO, J.E.. Aplicação de Si em milho e feijão-de corda sob estresse salino. *Revista Ciência Agronômica*, 2011, v.42, n. 2, p.398-403.
- LOBATO A.K.S., COSTA R.C.L., NETO M.A.M., OLIVEIRA NETO C.F., SANTOS FILHO B.G., ALVES G.A.R., COSTA K.C., SILVA L.I., CONRADO T.V., MALEIA M.P.. Consequences of the water deficit on nitrogen compounds in pepper (cv. Vermelho gigante) plants. *Res J Biol Sci* 4, 2009, p760-764. ISSN: 1815-8846.
- MA, J. F., YAMAJI, N., MITANI, N., TAMAI, K., KONISHI, S., FUJIWARA, T., KATSUHARA, M., YANO, M.. An efflux transporter of silicon in rice. *Nature*, London, , 2007v. 448, n. 7150, p. 209-212.
- MARQUES, D. J.. *Estresse mineral induzido por fertilizantes potássicos em plantas de berinjela (Solanum melogena L.) e seu efeito sobre parâmetros agronômicos e metabólicos*. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Horticultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP. Botucatu. 2009.
- MAUAD, M; CRUSCIOL, C.A.C., FILHO, H.G.. Produção de massa seca e nutrição de cultivares de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. *Semina*, 2011, V. 32, n.3, p.939-948.
- MELO, S.P. ET AL.. Silicon accumulation and water deficit tolerance in Brachiaria grasses. *Scientia Agrícola*, 2003, v.60, n.4, p. 755-759.
- NAYYAR, H.. Accumulation of osmolytes and osmotic adjustment in water-stressed wheat (*Triticum aestivum*) and maize (*Zea mays*) as affected by calcium and its antagonists. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, v. 50, p. 253-264.
- PEI, Z. F., MING D. F., LIU D., WAN G.L., GENG X.X., GONG H.J., ZHOU W.J.. Silicon improves the tolerance to water deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat

(*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2010, v.29, p. 106–115.

SANCHOTENE, D.M., KRUSE, N.D., AVILA, L.A., MACHADO, S.L.O., NICOLODI, G.A., DORNELLES, S.H.B.. Efeito do protetor dietholate na seletividade de clomazone em cultivares de arroz irrigado. *Planta Daninha*. 2010, V. 28, n.2, p.339-346. Viçosa.

SCHMIDT, R.E., ZHANG, X., CHALMERS, D.R.. Response of photosynthesis and superoxide dimutase to silica applied to creeping bentgrass grown under two fertility levels. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22:1763-1773.

SFALCIN, R. A. *Avaliação de parâmetros fisiológicos e bioquímicos em berinjela (Solanum melongena L.) cultivada sob diferentes potenciais de água no solo*. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

SHARMA, P., DUBEY, R.S.. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminium toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. *Journal of Plant Physiology*, 2005, v. 162, p. 854-862.

SHEN X., ZHOU Y., DUAN L., LI Z., ENEJI A.E., LI J.. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, 2010, v.167, n.15, p. 1248-1252.

SHI, Q.H. ET AL.. Silicon mediated alleviation of Mn toxicity in *Cucumis sativus* in relation to activities of superoxide dismutase and ascorbate peroxidase. *Phytochemistry*, 2005, v.41, n.66, p.1551-1559.

SPATT, L.L.. *Desempenho fotossintético e eficiência de herbicidas em Urochloa plantaginea (Poaceae) submetidas às diferentes condições hídricas do solo e doses de nitrogênio*. 2018. Dissertação (Mestrado em Agrobiologia) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2018, 15p.

SOUZA, V. C., LORENZI, H.. Botânica Sistemática: Guia ilustrado para identificação das famílias de Angiospermas da flora brasileira, baseado em APG II. *Instituto Plantarum*, 2005, 640p.

TAIZ, L., ZEIGER, E., MOLLER, I.M., MURPH, A.. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6ª ed. Artmed Editora S.A., 2017, 120p.

WANG, S.Y., GALLETTA, G.J.. Foliar application of potassium silicate induces metabolic changes in strawberry plants. *Journal of Plant Nutrition*, 1998, v.21. p.157-167.

WANGA, F.Z., WANGA, Q.B., KWOND, S.Y., KWAKB, S.S., SUA, W.A.. Enhanced drought tolerance of transgenic rice plants expressing a pea manganese superoxide dismutase. *Journal of Plant Physiology*, Stuttgart, 2005, v. 162, n. 4, p. 465-472.

WOODRUFF, DAVID R., MEINZER, FREDERICK C.. Size-dependent changes in biophysical control of tree growth: The role of turgor. In: Size-and age-related changes in tree structure and function. *Springer Netherlands*, 2011, p. 363-384.

VERMAS, S., DUBEY, R.S.. Lead toxicity lipid peroxidation and alters the activities of antioxidant enzymes in growing rice plants. *Plant Science*, 2003, v.164, p.645-655.

**5. CAPÍTULO II: SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR FRIO EM
SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE**

SILÍCIO NA MITIGAÇÃO DE ESTRESSE POR FRIO EM SEMENTES DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE

RESUMO

Protetores químicos podem ser utilizados para aumentar a tolerância de culturas a herbicidas, facilitando o controle de plantas daninhas. Vem conquistando destaque no cenário orizícola o protetor dietholate, que confere às plantas de arroz tolerância a maiores doses de herbicidas, através da inibição de alguns compostos enzimáticos. Porém, estas, enzimas que o dietholate inibe, também são responsáveis por reduzir os efeitos danosos das espécies reativas de oxigênio (EROs) formados durante o metabolismo celular em condições de estresse bióticos e abióticos. Como solução para minimização desses efeitos, tem sido indicada a utilização de fertilizantes à base de silício (Si). O objetivo do trabalho foi avaliar os possíveis efeitos benéficos do Si na mitigação do estresse por frio associados ao estresse pelo tratamento com o protetor dietholate em sementes de arroz na fase de semeadura-germinação. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três repetições, e os tratamentos arranjados em esquema fatorial 3x2x2x4x2: três temperaturas (5, 10 e 20 °C), duas cultivares (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), dois tratamentos de semente (sem e com dietholate) quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹) e duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio). As unidades experimentais foram placas de petri, com vinte sementes de arroz. O processo germinativo das sementes de arroz e o índice e velocidade de germinação (IVG) foi influenciado negativamente pelo tratamento de semente com dietholate, principalmente em temperatura de 5 e 10 °C, a cultivar IRGA 424 RI é mais resistente ao estresse por baixas temperaturas e aos efeitos fitotóxicos do protetor dietholate. A fonte de Si metassilicato de sódio foi mais eficiente para o aumento do comprimento de parte aérea e radícula, de sementes tratadas e não tratadas com dietholate. Portanto, o Si atenua o estresse por baixas temperaturas em sementes de arroz tratadas com dietholate.

Palavras-chave: Estresse abiótico. Protetor de semente. *Oryza sativa* L..

SILICON IN COLD STRESS MITIGATION IN DIETHOLATE-TREATED RICE SEEDS

ABSTRACT

Chemical protectors can be used to increase crop tolerance to herbicides, facilitating weeds control. Has gained prominence in the rice, the dietholate protector, which gives plants tolerance to higher herbicide doses, by inhibiting some enzymatic compounds. However, these enzymes that dietholate inhibits are also responsible for reducing the harmful effects of reactive oxygen species (ROS) formed during cellular metabolism under biotic and abiotic stress conditions. As a solution to minimize these effects, the use of silicon (Si) fertilizers has been indicated. The objective of this work was to evaluate the possible beneficial effects of Si on the mitigation of cold stress associated with stress by treatment with the dietholate protector in rice seeds in the sowing-germination phase. The experimental design was completely randomized, with three replications, and the treatments arranged in a 3x2x2x4x2 factorial scheme: three temperatures (5, 10 and 20 °C), two cultivars (IRGA 424 RI and Guri INTA CL), two seed treatments (without and with dietholate) four doses of Si (0, 4.0, 8.0 and 16 mg L⁻¹) and two sources of Si (sodium metasilicate and potassium metasilicate). The experimental units were petri dishes with twenty rice seeds. The germination process of rice seeds and germination index and speed (IVG) were negatively influenced by dietholate seed treatment, mainly at 5 and 10 ° C, the cultivar IRGA 424 RI is more resistant to low temperature stress, and to the phytotoxic effects of dietholate protector. Sodium metasilicate Si source was more efficient for increasing shoot and root length of dietholate treated and untreated seeds. Therefore, Si attenuates low temperature stress in dietholate-treated rice seeds.

Keywords: Abiotic stress. Safeners. *Oryza sativa* L ..

INTRODUÇÃO

Protetores de plantas, ou safeners, são produtos químicos usados com a finalidade de promover a seletividade de herbicidas, através da proteção da cultura à fitotoxicidade do herbicida, sem reduzir a eficiência no controle das plantas daninhas (SANCHOTENE et al., 2010). E a utilização desses protetores vem conquistando destaque no cenário orizícola, para a cultura do arroz irrigado, está registrado, o protetor dietholate.

Segundo Karam et al. (2003) o tratamento de sementes com o dietholate (0,0- diethyl 0 phenyl phosphorothioate) confere às plantas delas originadas tolerância a maiores doses de clomazone, através da inibição de enzimas como a SOD (superóxido dismutase), a GST (glutamina sintetase) e do pigmento celular P₄₅₀ mono-oxigenase (YUN et al., 2005) o qual é responsável pela ativação do efeito tóxico do herbicida clomazone ao transformá-lo, por hidroxilação, em 5-ceto-clomazone um metabólito tóxico para as plantas (FERHATOGLU et al., 2006; TENBROOK et al., 2006), não sendo transformado, o clomazone é conjugado com açúcares no citoplasma e carregado para os vacúolos das células por intermédio de carregadores de membrana do tonoplasto (FERHATOGLU et al., 2005) .

Porém, estes compostos enzimáticos que o dietholate inibe também são responsáveis por reduzir os efeitos danosos das espécies reativas de oxigênio (EROS) formados durante o metabolismo celular (GILL et al., 2013) em condições de estresse bióticos e abióticos.

Nas últimas safras, os rizicultores têm relacionado um efeito estressor do dietholate, sobre sementes da cultivar Guri INTA CL, associado ao estresse por frio, na época de semeadura/germinação (final de setembro até meados de outubro), que também é um dos períodos mais sensíveis à interferência por frio na cultura do arroz (ROSA et. al, 2017). A temperatura ideal para o desenvolvimento da cultura situa-se entre 25 °C e 30 °C (YOSHIDA, 1981), com a semeadura antecipada, nos meses de setembro/outubro, o período reprodutivo acontece numa época de maior intensidade de radiação solar (dezembro/janeiro), favorecendo o aumento da produtividade (MERTZ et al., 2009), entretanto, a ocorrência de temperaturas abaixo de 15 °, no Rio Grande do Sul, é muito comum nesses meses também, resultando em uma menor porcentagem de germinação e atraso do desenvolvimento inicial das plantas tratadas com dietholate (CRUZ, 2001).

Como solução para minimização dos efeitos fitotóxicos do dietholate associados ao estresse por frio, tem sido indicado à utilização de fertilizantes à base de silício (Si), aplicados via tratamento de sementes ou no sulco de semeadura. De acordo com Rodrigues et al. (2011),

plantas que crescem em ambiente rico em Si, diferem daquelas presentes em condições de deficiência, principalmente quanto à tolerância a fatores abióticos. O Si é um dos elementos minerais que é citado como desencadeador da sinalização para a produção de enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX). Estas enzimas atuam como antioxidantes e estão relacionadas ao mecanismo de defesa das plantas contra as EROs (ASHRAF et al., 2010). Também ativa a expressão de genes envolvidos na produção de compostos secundários do metabolismo, como polifenóis e outras fitoalexinas (GRATÃO et al., 2005). A produção destes compostos pode ser resultado do efeito indireto da acumulação de silício nas plantas (SHEN et al., 2010). Da mesma forma, estimulando a produção de compostos osmoprotetores, tais como: prolina, glicina-betaína, poliálcoois, entre outros (ETESAMI et al., 2017), o Si pode ativar as defesas das células vegetais aos efeitos estressores das baixas temperaturas (ROSA et al., 2017). Assim, o Si pode trazer benefícios à cultura do arroz quando esta for semeada em condições de frio. À vista disso, tem sido muito estudado o efeito do Si como um provável estimulador de defesas aos estresses abióticos nesta cultura (MAUAD et al., 2011), restando avaliar o seu possível papel na redução de efeitos tóxicos por safeners como o dietholate.

Desta forma, em função da aplicabilidade dos resultados, este estudo objetiva avaliar os possíveis efeitos benéficos do Si em mitigar estresses induzidos pelo tratamento de sementes de arroz com o protetor dietholate associados ao estresse por frio.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais, durante o período de fevereiro à março de 2018. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, e os tratamentos com três repetições, arranjados em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2$: três temperaturas para germinação (5, 10 e 20 °C), duas cultivar (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), dois tratamentos de semente (sem e com dietholate) quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹) e duas fontes de Si (metassilicato de sódio (composição: Na₂O ≅ 28%; SiO₂ ≅ 27%; Fe ≅ 0,02%) e metassilicato de potássio (composição: N ≅ 3%; P₂O₅ ≅ 2%; K₂O ≅ 15%; SiO₂ ≅ 25%)).

As unidades experimentais foram placas de Petri (150 mm de diâmetro) com duas camadas de papel germitest, contendo 20 sementes por placa, as mesmas foram tratadas e não tratadas com o protetor de sementes dietholate (Permit Star®) na dose de 6 mL por kg de sementes.

As soluções de Si provenientes das duas fontes (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio) foram preparadas nas doses de 0,0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹ sendo diluídas em água destilada e o pH ajustado para 5,8±1.

Conforme protocolo proposto por Ferreira e Aquila (2000), as sementes de arroz foram inoculadas nas placas de Petri, e após a inoculação, as placas foram mantidas em diferentes câmaras de germinação B.O.D., com fotoperíodo de 16 horas, reguladas para três temperaturas (5, 10 e 20 °C), durante sete dias. Posteriormente, foram transferidas para sala de crescimento com fotoperíodo de 16 horas (R.F.A de ~73 μmol m⁻² s⁻¹) e temperatura de 25 °C ±1, permanecendo por mais sete dias.

O número de sementes germinadas foi aferido a cada 24 h durante o período de sete dias na sala de crescimento. Foram consideradas germinadas as sementes que apresentaram no mínimo 1,0 mm de radícula, sendo então obtida a porcentagem de germinação (%G), conforme Labouriau e Valadares (1976) e o índice de velocidade de germinação (IVG), conforme Maguire (1962).

Procedeu-se à análise de variância para as variáveis respostas, sendo os fatores analisados pelo teste de Tukey em nível de 0,05 de probabilidade de erro, exceto as doses de Si que foram ajustados modelos polinomiais, utilizando-se o programa estatístico Sisvar® 5.3 (FERREIRA, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A variável porcentagem de germinação apresentou interação significativa para todos os fatores (temperatura x cultivar x tratamento de sementes x dose de Si x fonte de Si). Já a variável índice e velocidade de germinação (IVG) mostrou interação entre temperatura x tratamento de semente x dose de Si x fontes de Si, não havendo efeito das cultivares pelo teste F ($p < 0,05$), assim, para essa variável, os modelos de regressão e tabelas foram obtidos com a média das duas cultivares.

De modo geral, o tratamento de semente para a variável porcentagem de germinação apresentou diferença estatística, sendo possível observar que o processo germinativo das sementes de arroz foi influenciado negativamente pelo tratamento de semente com dietholate. Dos dezesseis tratamentos com dietholate em combinações para cada uma das temperaturas 5, 10 e 20 °C, em torno de 69, 75 e 37% respectivamente, o dietholate causou estresse oxidativo, nesse sentido, também observou-se que os efeitos deletérios do dietholate sobre o processo germinativo foram desencadeados em maior proporção nas temperaturas mais baixas de 5 e 10 °C, sendo menos expressivos em temperatura de 20 °C (Tabela 1). Podendo-se inferir que, quanto mais baixa a temperatura, maiores são os danos oxidativos do dietholate sobre a porcentagem de germinação. Isso se deve, possivelmente, pelo fato que as plantas geram espécies reativas de oxigênio (EROs) em condições de estresse por baixas temperaturas, ativando também várias enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT) em resposta a estas condições externas de estresse. Porém, o dietholate pode ter induzido uma inibição dessas enzimas antioxidantes que são importantes na desintoxicação celular do excesso de EROs, sendo do ponto de vista da proteção das plântulas um efeito indesejável, causando uma situação de sérios desequilíbrios entre a produção de EROs e as defesas antioxidantes. Assim, a baixa porcentagem germinativa das sementes tratadas com dietholate obtidos no presente trabalho, possivelmente, ocorreu devido às alterações no metabolismo das mesmas durante o processo germinativo. Estes resultados corroboram com Mistura et al. (2008) e Galon et al. (2011), os quais encontraram que o protetor de sementes dietholate na cultura do arroz interfere negativamente na germinação da semente e proporcionou reduções da porcentagem de germinação e emergência das plântulas de até 30%. Além disso, outra hipótese é a de que a cobertura das sementes com o protetor dietholate pode ter reduzido à velocidade de absorção de água, a qual é indispensável para desencadear os processos metabólicos e bioquímicos da germinação.

Tabela 1 – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, fontes e doses de Si para o fator tratamento de sementes. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	FONTE DE SILÍCIO	CULTIVAR	TRATAMENTOS DE SEMENTE	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	48 a	62 a	52 b	32 b
			sem dietholate	61 a	50 a	68 a	65 a
		Irga 424 RI	com dietholate	45 b	72 a	65 b	60 b
			sem dietholate	85 a	83 a	82 a	93 a
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	48 b	73 a	73 b	77 b
			sem dietholate	78 a	83 a	90 a	92 a
		Irga 424 RI	com dietholate	67 b	67 b	67 b	83 a
			sem dietholate	97 a	92 a	93 a	95 a
10 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	57 b	60 b	58 b	45 b
			sem dietholate	88 a	85 a	88 a	88 a
		Irga 424 RI	com dietholate	68 b	72 b	72 b	62 b
			sem dietholate	95 a	90 a	90 a	90 a
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	70 b	72 b	90 a	73 b
			sem dietholate	85 a	93 a	93 a	97 a
		Irga 424 RI	com dietholate	67 b	80 a	95 a	80 a
			sem dietholate	90 a	93 a	95 a	85 a
20 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	43 b	80 a	68 b	0 b
			sem dietholate	90 a	92 a	93 a	93 a
		Irga 424 RI	com dietholate	85 a	85 a	60 b	0 b
			sem dietholate	95 a	92 a	98 a	90 a
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	90 a	82 a	85 a	84 a
			sem dietholate	92 a	90 a	88 a	92 a
		Irga 424 RI	com dietholate	68 b	85 a	88 a	88 a
			sem dietholate	93 a	95 a	93 a	93 a
				CV (%) 11,57			

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre os tratamentos de semente, pelo teste de Tukey (p≤0,05).

Em relação à temperatura, para a variável porcentagem de germinação (Tabela 2), observou-se, de modo geral, que as sementes tratadas com dietholate demonstraram uma porcentagem de germinação maior em temperaturas de 10 e 20 °C, quando suplementadas com Si até a dose de 8,0 mg L⁻¹ nas duas fontes testadas. E houve uma diminuição da germinação nas três temperaturas (5, 10 e 20 °C) na dose de 16 mg L⁻¹ de metassilicato de potássio. Já a porcentagem germinativa das sementes não tratadas com dietholate foi influenciada pela temperatura apenas quando as sementes foram suplementadas com Si na fonte metassilicato de potássio, onde se obteve menor porcentagem de germinação em temperatura de 5 °C, não havendo relação de dose dependente de metassilicato de potássio. Em estudo realizado por Liang; et al (2008), avaliando o efeito do Si no aumento da tolerância de duas cultivares de trigo à estresse por congelamento (-5 °C), os autores relataram que o Si pode aliviar o estresse e melhorar o crescimento do trigo sob congelamento. Os possíveis mecanismos envolvidos podem ser atribuídos à maior atividade de defesa antioxidante, diminuição da peroxidação lipídica e da sinalização para produção de compostos

osmoprotetores, tais como: prolina, glicina-betaína, poliálcoois, entre outros (ETESAMI et al.,2017). O aumento nos níveis de prolina atua no ajuste osmótico da planta, auxiliando na tolerância ao frio através da manutenção da integridade da membrana, evitando a desidratação celular provocada pela pressão osmótica (HUANG et al., 2012).

Tabela 2 – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, sob diferentes cultivares, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator temperatura. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SILÍCIO	TRATAMENTOS DE SEMENTE	CULTIVAR	FONTE DE SILÍCIO	TEMPERATURA			
				5 °C	10 °C	20 °C	
0 mg L ⁻¹	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	48 c	70 b	90 a	
			Metassilicato de potássio	48 a	57 a	43 a	
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	65 a	65 a	70 a	
			Metassilicato de potássio	45 b	70 a	85 a	
		sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	80 a	85 a	90 a
				Metassilicato de potássio	60 b	90 a	90 a
	Irga 424 RI		Metassilicato de sódio	95 a	90 a	95 a	
			Metassilicato de potássio	85 a	95 a	95 a	
	4,0 mg L ⁻¹	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	75 a	70 a	80 a
				Metassilicato de potássio	60 b	60 b	80 a
			Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	65 b	80 ab	85 a
				Metassilicato de potássio	70 b	70 b	90 a
sem dietholate			Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	90 a	90 a	95 a
				Metassilicato de potássio	50 b	85 a	90 a
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	85 a	95 a	90 a	
			Metassilicato de potássio	85 a	90 a	85 a	
8,0 mg L ⁻¹		com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	75 b	95 a	85 ab
				Metassilicato de potássio	50 a	65 a	70 a
			Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	65 b	95 a	90 a
				Metassilicato de potássio	65 a	70 a	60 a
	sem dietholate		Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	90 a	90 a	90 a
				Metassilicato de potássio	70 b	90 a	19 a
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	95 a	95 a	95 a	
			Metassilicato de potássio	80 a	90 a	100 a	
	16 mg L ⁻¹	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	75 a	75 a	85 a
				Metassilicato de potássio	30 a	45 a	0 b
			Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	80 a	80 a	90 a
				Metassilicato de potássio	60 a	60 a	0 b
sem dietholate			Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	90 a	95 a	90 a
				Metassilicato de potássio	65 b	90 a	95 a
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	95 a	85 a	95 a	
			Metassilicato de potássio	95 a	90 a	90 a	
CV (%) 11,567							

*Médias não seguidas por mesma letra na linha, diferem estatisticamente entre as temperaturas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Comparando as fonte de Si para a variável porcentagem de germinação, observou-se que dos seis tratamentos em combinação para cada uma das temperaturas de 5, 10 e 20 °C, o metassilicato de sódio se mostrou mais eficiente no aumento da porcentagem de germinação das sementes tratadas com dietholate em 50, 66 e 66% respectivamente, em comparação com

a fonte metassilicato de potássio. Para as sementes não tratadas com dietholate, não houve diferença significativa entre as fontes de Si em temperatura de 10 e 20 °C, já em temperatura de 5 °C o metassilicato de sódio proporcionou, dos seis tratamentos em combinação, um aumento de 50% na porcentagem de germinação em relação ao metassilicato de potássio (Tabela 3). Isso se deve possivelmente, as diferentes composições de cada uma das fontes. A fonte metassilicato de sódio possui em sua composição ferro (Fe), que participa, em baixas concentrações, do processo antioxidante contra EROs, em associação com enzimas (Halliwell; Gutteridge, 1985) possuindo importante papel como componente de enzimas, envolvidas na transferência de elétrons (reações redox) (TAIZ et al., 2017).

Tabela 3 – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, tratamento de semente e doses de silício para o fator fonte de silício. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	TRATAMENTOS DE SEMENTE	CULTIVAR	FONTE DE SILÍCIO	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	48	73 a	73 a	77 a
			Metassilicato de potássio	48	62 a	52 b	32 b
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	67	67 a	667 a	82 a
	Metassilicato de potássio		45	72 a	65 a	60 b	
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	78	83 a	90 a	92 a
			Metassilicato de potássio	62	50 b	68 b	65 b
Irga 424 RI		Metassilicato de sódio	97	92 a	93 a	95 a	
	Metassilicato de potássio	85	83 a	82 a	93 a		
10 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	70	72 a	93 a	73 a
			Metassilicato de potássio	57	60 a	58 b	45 b
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	67	80 a	95 a	80 a
	Metassilicato de potássio		68	72 a	73 b	67 b	
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	85	93 a	90 a	97 a
			Metassilicato de potássio	88	85 a	88 a	88 a
Irga 424 RI		Metassilicato de sódio	90	94 a	95 a	85 a	
	Metassilicato de potássio	95	90 a	90 a	90 a		
20 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	90	82 a	85 a	80 a
			Metassilicato de potássio	43	80 a	68 b	0 b
		Irga 424 RI	Metassilicato de sódio	68	85 a	88 a	88 a
	Metassilicato de potássio		85	92 a	60 b	0 b	
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	92	90 a	88 a	92 a
			Metassilicato de potássio	90	92 a	93 a	93 a
Irga 424 RI		Metassilicato de sódio	93	95 a	93 a	93 a	
	Metassilicato de potássio	95	85 a	98 a	90 a		

CV (%)= 11,57

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre as fontes de silício, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Entre as cultivares, para a variável porcentagem de germinação, verificou-se que dos dezesseis tratamentos em combinações para cada umas das temperaturas 5, 10 e 20 °C a cultivar IRGA 424 RI obteve maior porcentagem de germinação de 37, 6 e 12% respectivamente, para as sementes tratadas e não tratadas com dietholate, nas duas fontes de Si (Tabela 4). Todas as cultivares de arroz desenvolvidas nos Estados do RS e de SC são sensíveis aos estresses de baixa temperatura. Entretanto, algumas cultivares desenvolvidas no

RS são adaptadas às regiões mais frias, como a Campanha e a Zona Sul, podendo-se destacar a cultivares IRGA 424 RI, no estágio de germinação-emergência (SOSBAI, 2018), em função disso, é possível que a cultivar tenha resistido melhor ao estresse por frio. Estes resultados vão de encontro aos observados por Cruz et al. (2010), que apesar de ser considerada uma cultivar com boa adaptação às condições de média e baixa temperatura, em ensaio de sensibilidade ao frio, a cultivar IRGA 424 RI apresentou sobrevivência de apenas 2,5% de plântulas.

Tabela 4 – Médias da porcentagem de germinação de sementes de arroz, sob diferentes temperaturas, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator cultivares. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	TRATAMENTO DE SEMENTE	FONTE DE SILÍCIO	CULTIVAR	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	48 a	62 a	52 a	32 b
			IRGA 424 RI	45 a	72 a	65 a	60 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	48 b	73 a	73 a	77 a
			IRGA 424 RI	67 a	67 a	67 a	82 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	62 b	50 b	68 a	65 b
			IRGA 424 RI	85 a	83 a	82 a	93 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	78 b	83 a	90 a	92 a
			IRGA 424 RI	97 a	92 a	93 a	95 a
10 ° C	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	57 a	60 a	58 a	45 b
			IRGA 424 RI	68 a	72 a	72 a	62 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	70 a	72 a	93 a	73 a
			IRGA 424 RI	67 a	80 a	95 a	80 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	88 a	85 a	88 a	88 a
			IRGA 424 RI	95 a	90 a	90 a	90 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	85 a	93 a	90 a	97 a
			IRGA 424 RI	90 a	93 a	95 a	85 a
20 ° C	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	43 b	80 a	68 a	0 a
			IRGA 424 RI	85 a	92 a	60 a	0 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	90 a	82 a	85 a	83 a
			IRGA 424 RI	68 b	85 a	88 a	88 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	90 a	92 a	93 a	93 a
			IRGA 424 RI	95 a	85 a	98 a	90 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	92 a	90 a	88 a	92 a
			IRGA 424 RI	93 a	95 a	93 a	93 a
CV (%)= 11,57							

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre as cultivares, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na análise de regressão das doses de Si, para a variável porcentagem de germinação (Figura 1a, 1b, 1c e 1d), verificou-se que as sementes não tratadas com dietholate, as doses de Si das duas fontes, não proporcionaram aumento significativo da porcentagem de germinação sob as três condições de temperatura (5, 10 e 20 °C), nas duas cultivares (Guri INTA CL e IRGA 424 RI). Provavelmente, isso se deve ao fato que as células normalmente toleram o estresse oxidativo brando, o qual frequentemente resulta na modificação da regulação do sistema de defesa antioxidante na tentativa de restaurar o balanço oxidante e antioxidante (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 1999), o próprio sistema de defesa antioxidante da planta amenizou o estresse oxidativo causado pelo frio. Entretanto, para a análise de regressão das

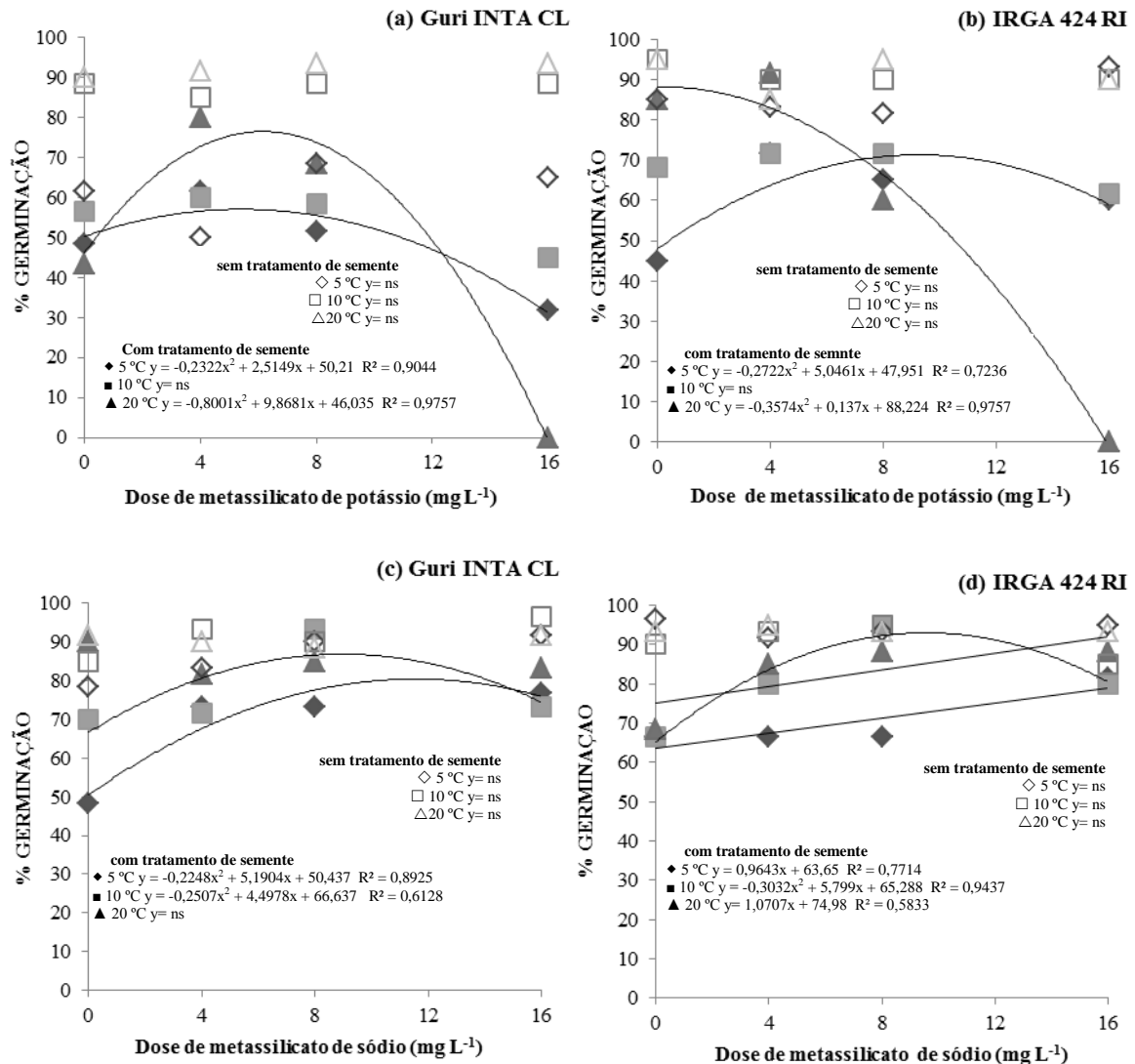
doses de Si, em sementes tratadas com dietholate, de modo geral, os percentuais germinativos das sementes aumentaram para as três condições de temperatura (5, 10 e 20 °C). Na Figura 1 a e 1c, em temperatura de 5 °C, a porcentagem de germinação das sementes da cultivar Guri INTA CL, aumentou de forma quadrática nas duas fontes de silício, tendo seus pontos de máxima, nas doses de 11,8 mg L⁻¹ da fonte metassilicato de sódio e 5,5 mg L⁻¹ da fonte metassilicato de potássio. Já para a cultivar IRGA 424 RI (Figura 1b e 1d), também em temperatura de 5 °C, houve um aumento quadrático na fonte metassilicato de potássio com ponto de máxima na dose de 9,3 mg L⁻¹, e um aumento linear da porcentagem de germinação para a fonte metassilicato de sódio. Para as sementes das duas cultivares de arroz tratadas com dietholate em temperatura de 10 °C (Figura 1a e 1b), não teve aumento significativo da porcentagem de germinação, com o aumento das doses de Si na fonte metassilicato de potássio. Já na fonte metassilicato de sódio (Figura 1c e 1d), ocorreu um aumento quadrático na porcentagem de germinação de ambas cultivares de arroz, com pontos de máxima na dose de 9 mg L⁻¹ para a cultivar Guri INTA CL e 9,6 mg L⁻¹ para a cultivar IRGA 424 RI. Para as doses de Si da fonte metassilicato de sódio, em temperatura de 20 °C, observou-se que para a cultivar Guri INTA CL tratada com dietholate, não teve efeito significativo das doses, e para a cultivar IRGA 424 RI, houve um aumento linear da porcentagem de germinação.

Em relação às doses de Si da fonte metassilicato de potássio (Figura 1a e 1b), para ambas cultivares, em temperatura de 20 °C, verificou-se um comportamento quadrático, havendo um aumento na porcentagem de germinação até seus pontos de máxima em 7 mg L⁻¹ e de 2 mg L⁻¹, porém, quando as doses são muito altas (16 mg L⁻¹), o metassilicato de potássio causou inibição do processo germinativo das sementes de arroz nas duas cultivares avaliadas. A inibição do processo germinativo pode provir do fato de que, qualquer nutriente absorvido em excesso pode provocar um desbalanço nutricional na planta, inclusive o metassilicato de potássio. É necessário considerar os nutrientes como um todo, porque, no processo de absorção, um pode exercer influência sobre o outro, dadas as possíveis interações que podem ocorrer (MALAVOLTA et al., 1997). Em conformidade com Vieira et al. (2011), em experimento com aplicação de silicato de cálcio em arroz irrigado, obtiveram efeitos positivos na qualidade das sementes, entretanto doses excessivas de Si afetaram a qualidade das mesmas.

O Si é um dos elementos minerais que é citado como desencadeador da sinalização para a produção de enzimas como superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e peroxidase do ascorbato (APX) (ASHRAF et al., 2010). Estas enzimas atuam como antioxidantes e estão relacionadas ao mecanismo de defesa das plantas contra as EROs (ASHRAF et al., 2010).

Outros benefícios do Si dizem respeito ao estímulo à sinalização para produção de compostos osmoprotetores como prolina, glicina-betaína, poliálcoois entre outros (ETESAMI et al.,2017). Estimulando a produção desses compostos osmoprotetores, o Si pode ativar as defesas das células vegetais aos efeitos estressores das baixas temperaturas (ROSA et al., 2017). A prolina, como aminoácido e antioxidante não enzimático (ASHRAF; FOOLAD, 2007) atua, principalmente na osmoproteção (CAYLEY et al., 1992), na estabilização de proteínas e na proteção das membranas contra os efeitos deletérios das EROs (SHARMA; DUBEY, 2005),o aumento nos níveis de prolina também atua no ajuste osmótico da planta, auxiliando na tolerância ao frio através da manutenção da integridade da membrana, evitando a desidratação celular provocada pela pressão osmótica (HUANG et al., 2012). Devido a esses mecanismo, o Si aumenta a tolerância da planta ao frio e diminui o congelamento que ocorre dentro da célula porque ele mantém a célula intacta, sem rompimento. Assim que a temperatura volta a subir, à planta volta a sua atividade metabólica normal (LEVITT, 1980). Sugerindo-se assim, que as doses das duas fontes de Si (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio) podem trazer benefícios à cultura do arroz como alternativa viável para um decréscimo dos estresses oxidativos do dietholate em sementes sob estresses por baixas temperaturas, ocorridos na fase de semeadura/germinação.

Figura 1 – Relação entre a porcentagem de germinação das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL, com e sem tratamento de semente com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de Si de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.



Para o tratamento de semente em relação a variável índice de velocidade de germinação, é possível observar que dos oito tratamentos com dietholate em combinações para cada uma das temperaturas 5, 10 e 20 °C, em torno de 62, 87 e 100% respectivamente, obtiveram um índice de velocidade de germinação menor, em relação às sementes sem tratamento com dietholate (Tabela 5). Os resultados obtidos apresentaram uma relação de proporcionalidade com os da porcentagem de germinação, onde em temperatura mais baixas de 5 e 10 °C foi menor a velocidade de germinação das sementes. Isto ocorreu, possivelmente, porque as sementes possuem algum grau de sensibilidade, a qual contribui o menor índice de velocidade de germinação. Além disso, outra hipótese é a de que a cobertura das sementes

com o protetor dietholate reduza a velocidade de absorção de água. A qual é indispensável para desencadear os processos metabólicos e bioquímicos da germinação, ocasionando desse modo uma redução do índice de velocidade de germinação (MISTURA et al., 2008).

Tabela 5 – Médias do índice e velocidade de germinação de sementes de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, fontes e doses de silício para o fator tratamento de sementes. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	FONTE DE SILÍCIO	TRATAMENTOS DE SEMENTE	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
			0	4,0	8,0	16
5 ° C	Metassilicato de potássio	com dietholate	2,40 b	3,15 a	2,55 b	2,39 b
		sem dietholate	3,71 a	3,51 a	4,10 a	4,50 a
	Metassilicato de sódio	com dietholate	2,11 b	3,81 a	4,04 a	3,70 b
		sem dietholate	3,56 a	3,94 a	7,70 a	5,17 a
10 ° C	Metassilicato de potássio	com dietholate	2,48 b	2,92 b	3,07 b	2,54 b
		sem dietholate	9,08 a	8,44 a	8,86 a	8,8 a
	Metassilicato de sódio	com dietholate	3,24 a	3,95 b	4,95 b	3,91 b
		sem dietholate	4,05 a	5,48 a	6,16 a	6,85 a
20 ° C	Metassilicato de potássio	com dietholate	4,79 b	4,82 b	3,10 b	0,00 b
		sem dietholate	18,50 a	17,66 a	17,66 a	18,33 a
	Metassilicato de sódio	com dietholate	1,06 b	1,75 b	2,06 b	1,81 b
		sem dietholate	3,68 a	4,10 a	4,91 a	5,36 a
CV (%)= 17,31						

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre os tratamentos de semente, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Em relação à temperatura, na variável índice de velocidade de germinação, observou-se de modo geral, que as sementes tratadas com dietholate e suplementadas com Si na fonte metassilicato de potássio, dos quatro tratamentos em combinação, 75% apresentaram maior índice de velocidade de germinação em temperatura de 20 °C, em comparação com as temperaturas de 5 e 10 °C, em contra partida, para a fonte metassilicato de sódio, dos quatro tratamentos em combinação, o índice de velocidade de germinação se mostrou 100% mais elevado nas temperaturas de 5 e 10 °C. Para as sementes sem tratamento com dietholate e suplementadas com metassilicato de potássio, dos quatro tratamentos em combinação, 100% apresentaram o índice de velocidade de germinação maior na temperatura de 20 °C. Já na fonte metassilicato de sódio, dos quatro tratamentos em combinação, 100% apresentaram o índice de velocidade de germinação das sementes sem tratamento com dietholate, maior em temperatura de 10 °C (Tabela 6). Pesquisas mostram que sementes revestidas (com tratamento de sementes) necessitam de maior tempo para absorver a umidade do solo/substrato, podendo retardar o processo de germinação em até 48 horas a mais que as sementes sem tratamento com dietholate (COSTA et al., 2001) assim como o retardamento da penetração de oxigênio na semente, dificultando o processo germinativo (GALON et al., 2011) e afetando o desencadeamento dos processos metabólicos e bioquímicos da germinação (MISTURA et al., 2008). Somando-se a isto, a ocorrência de frio no estabelecimento da cultura também

ocasiona atraso tanto na germinação quanto na emergência de plântulas (MERTZ et al., 2009) amplificando o efeito retardante provocado pelo dietholate em função da redução do vigor das semente, que promove. Um bom desempenho nesses estádios é importante para garantir rápido e uniforme estabelecimento das plantas de arroz, incrementando a capacidade competitiva dessas em relação às plantas daninhas (CONCENÇO et al., 2007).

Tabela 6 – Médias do índice e velocidade de germinação de sementes de arroz, sob diferentes cultivares, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator temperaturas. Santa Maria, RS, 2019.

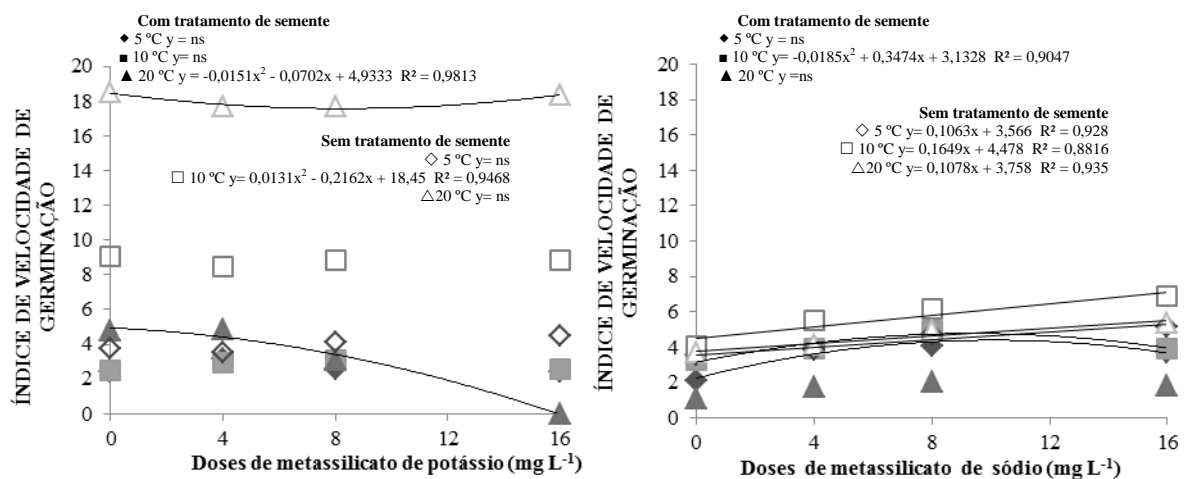
TRATAMENTOS DE SEMENTE	FONTE DE SILÍCIO	TEMPERATURA	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
			0	4,0	8,0	16
com dietholate	Metassilicato de potássio	5 ° C	2,401 b	3,151 b	2,55 a	2,40 a
		10 ° C	2,48 b	2,92 b	3,07 a	2,54 a
		20 ° C	4,79 a	4,83 a	3,10 a	0,00 b
	Metassilicato de sódio	5 ° C	2,11 ab	3,94 a	4,04 a	3,70 a
		10 ° C	3,25 a	3,94 a	4,94 a	3,91 a
		20 ° C	1,06 b	1,75 b	2,06 b	1,81 b
sem dietholate	Metassilicato de potássio	5 ° C	3,71 c	3,52 c	4,105 c	4,50 c
		10 ° C	9,08 b	8,44 b	8,86 b	8,80 b
		20 ° C	18,50 a	17,66 a	17,66 a	18,33 a
	Metassilicato de sódio	5 ° C	3,56 a	3,81 b	4,70 b	5,17 b
		10 ° C	4,04 a	5,48 a	6,16 a	6,85 a
		20 ° C	3,68 a	4,10 b	4,91 b	5,36 b
CV (%) 17,31						

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre as temperaturas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na análise de regressão das doses de Si para a variável índice de velocidade de germinação, observou-se que as sementes tratadas com dietholate na fonte metassilicato de potássio em temperatura de 20 °C e na fonte metassilicato de sódio em temperatura de 10 °C obtiveram um aumento quadrático no índice de velocidade de germinação, com pontos de máximo nas doses 2,33 e 9,44 mg L⁻¹ respectivamente. As demais temperaturas (5 e 10 °C) não apresentaram aumento significativo no índice de velocidade de germinação para ambas as fontes de Si. Analisando as sementes sem tratamento com dietholate, as doses de metassilicato de potássio proporcionaram um aumento significativo no índice de velocidade de germinação, de forma quadrática, em temperatura de 10 °C, com ponto de máxima na dose 8,3 mg L⁻¹ de metassilicato de potássio, já as demais temperaturas (5 e 20 °C) não apresentaram aumento significativo em relação ao fator doses. Para a fonte metassilicato de sódio houve um aumento linear no índice de velocidade de germinação das sementes sem dietholate, nas três temperaturas (5, 10 e 20 °C) (Figura 2). De acordo com Epstein (1994) e Datnoff et al. (2007) entre os benefícios do Si pode-se citar a adaptação das plantas a condições adversas, condições estas, que são proporcionadas durante a execução deste teste de índice de velocidade de germinação. Os resultados encontrados no presente trabalho estão de acordo

com os verificados por Rafi et al. (1997), com sementes de trigo por Pereira et al. (2010), Vieira et al. (2011) em sementes de arroz e por Matichenkov et al. (2005) em sementes de trigo, todos encontraram em seus trabalhos resultados positivos com a adição de Si, maximizando-se o vigor das sementes tratadas. De encontro, Oliveira et al., (2016) verificaram que o tratamento de sementes com Si não interferiu no índice de velocidade de germinação da cultivar BRS Querência em testes de envelhecimento acelerado e por frio. Tavares et al. (2011), que trabalharam com tratamento de Si em sementes de trigo, Santos et al. (2010), com sementes de brachiaria e Toledo et al. (2011) com sementes de aveia branca, também não encontraram efeitos significativos com a aplicação do Si nestas culturas.

Figura 2 – Relação entre o índice de velocidade de germinação das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL, com e sem tratamento de semente com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de Si de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.



No que diz respeito às fontes de Si para a variável IVG, observou-se que ambas as fontes de Si mostraram-se eficazes na mitigação dos efeitos oxidativos do protetor dietholate, desencadeados pelo estresse por frio. De modo geral, dos dezoito tratamentos em combinação, a fonte metassilicato de potássio proporcionou um aumento do índice de velocidade de germinação em 50% dos tratamentos e a fonte metassilicato de sódio em 22% (Tabela 7). Essa diferença entre as fontes deve-se, possivelmente, pelas diferentes composições de cada uma das fontes. A fonte metassilicato de potássio, possui em sua formulação 15% de potássio (K). O K é requerido como cofator de mais de 40 enzimas, além de ser o principal cátion no estabelecimento do turgor celular e manutenção da eletroneutralidade celular (WANG; WU, 2013).

Tabela 7 – Médias do índice de velocidade de germinação de sementes de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, tratamentos de semente e doses de silício para o fator fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	TRATAMENTO DE SEMENTE	FONTE DE SILÍCIO	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
			0	4,0	8,0	16
5 °C	com dietholate	Metassilicato de potássio	2,40	3,15 a	2,55 b	2,39 b
		Metassilicato de sódio	2,11	3,94 a	4,04 a	3,70 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	3,71	3,51 a	4,10 a	4,50 a
		Metassilicato de sódio	3,56	3,81 a	4,70 a	5,17 a
10 °C	com dietholate	Metassilicato de potássio	2,48	2,93 a	3,07 b	2,54 a
		Metassilicato de sódio	3,24	3,94 a	4,95 a	3,91 b
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	9,08	8,44 a	8,86 a	8,80 a
		Metassilicato de sódio	4,05	5,48 b	6,16 b	6,85 b
20 °C	com dietholate	Metassilicato de potássio	4,78	4,82 a	3,10 a	0,00 b
		Metassilicato de sódio	1,06	1,75 b	2,06 b	1,81 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	18,50	17,66 a	17,66 a	18,33 a
		Metassilicato de sódio	3,68	4,10 b	4,92 b	5,36 b
CV (%)= 17,31						

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre as fontes de silício, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

CONCLUSÃO

O processo germinativo das sementes de arroz e o índice e velocidade de germinação (IVG) foi influenciado negativamente pelo tratamento de semente com dietholate, principalmente em temperatura de 5 e 10 °C.

A cultivar IRGA 424 RI é mais resistente ao estresse por baixas temperaturas e aos efeitos fitotóxicos do protetor dietholate.

O Si aumentou a porcentagem de germinação e o IVG das sementes tratadas com dietholate.

Portanto, o Si atenua o estresse por baixas temperaturas em sementes de arroz tratadas com dietholate.

REFERÊNCIAS

- ASHRAF, M. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. *Biotechnol Adv*, 2010, 28(1). p.169-183.
- ASHRAF, M., FOOLAD, M. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environ. Exp. Bot.*, , 2007v. 59, p. 206-216, 2007
- CAYLEY S., LEWIS B.A, RECORD J.R., 1992. Origins of the osmoprotective properties of betaine and proline in *Escherichia coli* K-12. *J. Bacteriol* 175: 1586-1595.
- CONCENÇO, G. et al. Emergência e crescimento inicial de plantas de arroz e capim arroz em função do nível de umidade do solo. *Planta Daninha*, v.25, p.457-463, 2007.
- COSTA, C.E.L.; SILVA, R.F.; LIMA, J.O.G.; ARAÚJO, E.F. Sementes de cenoura, *Daucus carota* L., revestidas e peliculadas: germinação e vigor durante o armazenamento. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, vol. 26, p. 36-45. 2001.
- CRUZ, R. P. da; DUARTE, I. T. de L.; CABREIRA, C. Inheritance of rice cold tolerance at the seedling stage. *Science Agricola*, Piracicaba, v.67, n.6, p.669-674. 2010.
- DATNOFF, L. E.; RODRIGUES, F. A. SEEBOLD, K. W. Silicon and Plant Nutrition. In: DATNOFF L. E.; ELMER W.H.; HUBER D.M. (Eds.) *Mineral Nutrition and Plant Disease*. Saint Paul MN. APS Press. p.233-246, 2007.
- EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. *Proceeding National Academic Science*, v.91, p.11-17, 1994.
- ETESAMI, H.; JEONG, B.R; Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 147. p.881-896. 2017.
- FERHATAGLU, Y. AVDIUSHKO, S. BARRET, M. The basic for safening of clomazone by phorate insecticide in cotton and inhibitors of cytochrome p450s. *Pesticide Biochemistry Physiology*. V.81, n.1, p. 7-14, 2006.
- FERREIRA, A.G.; AQUILA, M.E.A. Alelopatia: uma área emergente da ecofisiologia vegetal. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v.12, n.1, p.175-204, 2000.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. *Ciência e Agrotecnologia*, v.38, n.2, p.109-112, 2014.
- GALON, L.; MACIEL, C. D. G.; AGOSTINETTO, D.; CONCENÇO, G.; MORAES, GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in *Agrokhimiya*, Rússia, 10: 59-63.
- GILL, S. S.; TUTEJA, N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in *Agrokhimiya*, Rússia, 10: 59-63.

GRATÃO P.L., POLLE A., LEA P.J., AZEVEDO R.A.. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, V. 32. p.481–494, 2005.

HALLIWELL, B. e GUTTERIDGE, J.M. *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford University Press. Oxford , UK. Third Edition, 1999.

HUANG, J.; SUN, S.; XU, D.; LAN, H.;SUN, H.; WANG, Z. et al. A TFIIIA-type zinc finger protein confers multiple abiotic stress tolerances in transgenic rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Mol Biol*, v. 80, p. 337–350, 2012.

KARAM, D. et al. Seletividade da cultura do milho ao herbicida clomazone por meio do uso de dietholate. *R. Bras. Milho Sorgo*, v. 2, n. 1, p. 72-79, 2003.

LABOURIAU, L. G.; VALADARES, M. E. B. 1976. On the germination of seeds *Calotropis procera* (Ait.) Ait.f. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v.48, n.2, p.263-284, 1976.

LEVITT, J. *Responses of plants to environmental stresses*. New York: Academic, 1980. 497p.

MAGUIRE, J. D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. *Crop Science*, Madison, v. 2, n. 1, jan./feb.176-177 p., 1962.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: *Potafos*, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. Academic. London. 1995. 889p.
Matichenkov VV, Kosobrukhov AA, Shabnova NI; Bocharnikova EA (2005) Plant response to silicon fertilizers under salt stress.

MAUAD, M; CRUSCIOL, C.A.C; FILHO, H.G. produção de massa seca e nutrição de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. *Semina*. V. 32, n.3, p.939-948. Londrina, 2011.

MERTZ, L.; HENNING, F. A.; SOARES, R. C.; BALDIGA, R. F.; PESKE, F. B.; DE MORAES, D. M. Alterações fisiológicas em sementes de arroz expostas ao frio na fase de germinação. *Revista Brasileira de Sementes*, v.31, v.2, 2009.

MISTURA, C. C.; BRANCO, J. C.; FREITAS, D. C.; ROSENTHAL, M. D.; MISTURA, C.C.; BRANCO, J.C.; FREITAS, D.A.C. et al. Influência do protetor de sementes dietil fenil fosforotioato sobre plântulas de arroz (*Oryza sativa* L.). *R. Bras. Agrociência*, Pelotas, v. 14, n.2, p. 231-238, abr-jun, 2008.

OLIVEIRA, S; LEMES, E.S; MENDONÇA, A.O; DIAS, L.W; BRUNES, A.P; LEITZKE, I.D; MENEGHELLO; TAVARES, L.C; tratamento de sementes de arroz com silício e qualidade fisiológica de sementes. *Revista de Ciências Agrárias*. V.39 (2). p.202-209. 2016.
Pereira EM, Vieira AR, Reis MS, Soares AA, Oliveira JÁ; Guimarães RM (2010) Qualidade fisiológica e enzimática de sementes de arroz de terras altas produzidas com diferentes doses de silício. 19º Congresso de Pós-Graduação UFLA, Lavras - MG. Anais, UFLA. p.22-26.

- RAFI M. M , EPSTEIN E.; FALK R.H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Journal of Plant Physiology*, 151:497-501, 1997.
- ROSA, T.D; HELGUEIRA, D.B; ALMEIDA, A.S; SOARES, V.N.; MATTOS, F.P; MEDEIROS, D.C. vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com dietholate isolado e em combinação em duas temperaturas. *Tecnol. & Ciência Agropecuária*. V.11, n.2, p.59-62; João Pessoa. 2017.
- SANCHOTENE D.M; KRUSE, N.D.; AVILA, L.A.; MACHADO, S.L.O; NICOLODI, G.A.; DORNELLES, S.H.B.D Efeito do protetor dietholate na seletividade de clomazone em cultivares de arroz irrigado. *Planta Daninha*. V. 28, n.2, p.339-346. Viçosa. 2010.
- SHARMA, P., DUBEY, R.S., 2005. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminium toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. *Journal of Plant Physiology*, v. 162, p. 854-862.
- SHEN X., ZHOU Y., DUAN L., LI Z., ENEJI A.E., LI J.. Silicon effects on photosynthesis and antioxidant parameters of soybean seedlings under drought and ultraviolet-B radiation. *Journal of Plant Physiology*, v.167, n.15, p. 1248-1252, 2010.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Farroupilha: SOSBAI, 2018. 10 p.
- TAIZ L , ZEIGER E, MOLLER I. M., MURPH A, *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6ª ed. Artmed Editora S.A., 2017. 120p.
- TAVARES, L.C.; BRAZ, H.S.; TUNES, L.M.; FONSECA, D.A.R.; BARROS, A.C.S.A. Desempenho de sementes de trigo recobertas com silício. In: XX CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, II *Amostra científica*. Pelotas, 2011.
- TENBROOK, P. L.; TJEERDEMA, R. S. Biotransformation of clomazone in rice (*Oryza sativa*) and early watergrass (*Echinochloa oryzoides*). *Pestic. Biochem. Physiol.*, v. 85, n. 1, p. 38-45, 2006.
- TOLEDO, M.Z.; CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A. C.; SORATO, R.P.; NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C. Physiological quality of soybean and wheat seeds produced with alternative potassium sources. *Revista Brasileira de sementes*, v. 33, n. 2, p. 363-371, 2011.
- VIEIRA, A. R.; OLIVEIRA, J. A.; GUIMARÃES, R. M.; CARVALHO, M. L.; PEREIRA, E. M.; CARVALHO, B.O. Qualidade de sementes de arroz irrigado produzidas com diferentes doses de silício. *Revista Brasileira de Sementes*, v.33, n.3, p.490-500, 2011.
- WANG,Y. ; WU, W. H. Potassium Transport and Signaling in Higher Plants. *Annual Review Plant Biology*, v.64, p.451–76, 2013.
- YOSHIDA, S. *Fundamentals of rice crop science*. Los Baños: The International Rice Research Institute, 1981. p.269.
- YUN, M. S. et al. Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -

susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 83, n. 2-3, p. 107-114, 2005.

**6. CAPÍTULO III: SILÍCIO NO CRESCIMENTO DE PLANTULAS DE ARROZ
TRATADAS COM DIETHOLATE E SUBMETIDAS A ESTRESSE POR FRIO**

SILÍCIO NO CRESCIMENTO DE PLANTULAS DE ARROZ TRATADAS COM DIETHOLATE E SUBMETIDAS A ESTRESSE POR FRIO

RESUMO

Quando as sementes de arroz recebem o tratamento com o protetor dietholate, o efeito do herbicida clomazone se torna mais seletivo para a cultura, facilitando o controle de plantas daninhas, entretanto, o dietholate pode causar fitotoxicidade no arroz interferindo negativamente no desenvolvimento das plântulas pós-germinação e na emissão de perfilhos, devido a inibição de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD) e catalase (CAT), que são importantes na desintoxicação celular do excesso de espécies reativas de oxigênio (EROS), causadas por estresses abióticos ou bióticos. Como solução para minimização desses efeitos, tem sido utilizado fertilizantes à base de silício (Si), um estimulador enzimático, que pode interferir no crescimento e no desenvolvimento de plantas ao promover sinalização para produção de compostos antioxidantes. O objetivo do trabalho foi avaliar os possíveis efeitos benéficos do Si na mitigação do estresses por frio associados ao estresses pelo tratamento com o protetor dietholate em sementes de arroz na fase de crescimento de plântula. O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com três repetições, e os tratamentos arranjados em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2$: três temperaturas (5, 10 e 20 °C), duas cultivares (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), dois tratamentos de semente (sem e com dietholate) quatro doses de silício (0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹) e duas fontes de silício (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio). As unidades experimentais foram placas de petri, com vinte sementes previamente germinadas. O tratamento de sementes com dietholate interferiu de forma negativa no comprimento de parte aérea e radícula, quanto mais baixa a temperatura, maiores foram os efeitos negativos do dietholate. A fonte de Si metassilicato de sódio foi mais eficiente no aumento do comprimento da parte aérea e radícula. Portanto, o Si atenua o estresse por baixas temperaturas em sementes de arroz tratadas com dietholate.

Palavras chave: Estresse abiótico. Metassilicato de sódio. Metassilicato de potássio.

SILICON IN GROWTH OF DIETHOLATE-TREATED RICE PLANTS SUBMITTED WITH COLD STRESS

ABSTRACT

When rice seeds receive treatment with the dietholate protector, the effect of clomazone herbicide becomes more selective for the crop, facilitating weed control, however, the dietholate may cause rice phytotoxicity, interfering negatively with post-seedling development and tiller emission due to inhibition of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT), which are important in the cellular detoxification of excess reactive oxygen species (EROS), caused by abiotic or biotic stresses. As a solution to minimize these effects, silicon (Si) based fertilizers have been used, an enzyme stimulator that can interfere with plant growth and development by promoting signaling for the production of antioxidant compounds. The objective of this work was to evaluate the possible beneficial effects of Si on the mitigation of cold stress associated with stress by treatment with the dietholate protector in rice seedlings during the seedling growth phase. The experimental design was completely randomized, with three replications, and the treatments arranged in a 3x2x2x4x2 factorial scheme: three temperatures (5, 10 and 20 °C), two cultivars (IRGA 424 RI and Guri INTA CL), two seed treatments (without and with dietholate) four doses of silicon (0, 4.0, 8.0 and 16 mg L⁻¹) and two sources of silicon (sodium metasilicate and potassium metasilicate). The experimental units were petri dishes with twenty seeds previously germinated. The seed treatment with dietholate interfered negatively on shoot and root length, the lower the temperature, the greater the negative effects of dietholate. The source of sodium Si metasilicate was more efficient in increasing the length of the shoot and root. Therefore, Si attenuates low temperature stress in dietholate-treated rice seeds.

Keywords: Abiotic Stress. Sodium metasilicate. Potassium metasilicate.

INTRODUÇÃO

O arroz é o segundo cereal mais cultivado no mundo, a média da produção brasileira chegou a 11,6 milhões de toneladas nos últimos cinco anos, sendo o Rio Grande do Sul o maior produtor brasileiro, com produção média de 8 mil toneladas nesse período (CONAB, 2019). O Rio Grande do Sul (RS) obteve nas últimas cinco safras, uma produtividade média de 7.594 kg ha⁻¹ de grãos de arroz (EMATER, 2019). Entretanto, está aquém do potencial produtivo estimado para as principais cultivares semeadas como a Guri INTA CL, Puitá INTA CL e IRGA 424 RI. Estas cultivares tem potencial genético para produzir até 12 toneladas ha⁻¹ em ótimas condições de cultivo (SOSBAI, 2017).

Vários fatores podem levar ao declínio das médias de rendimento de grãos obtidas com a cultura de arroz e estão relacionados a estresses bióticos ou abióticos. Entre os estresses bióticos, a interferência por competição das plantas daninhas poáceas (gramíneas) é um dos principais fatores (BEGON et al., 1986). Em função da dificuldade de controlar muitas destas poáceas via aplicação foliar de herbicidas, é necessário aplicá-los via solo.

O principal herbicida amplamente utilizado nas áreas produtoras de arroz do estado do RS é o clomazone, um pré-emergente, cujo mecanismo de ação inibe a síntese de carotenoides e interfere na fotossíntese (RUTLEDGE et al., 1998). O graminicida clomazone é tolerado pela cultura do arroz até determinadas doses, dependendo do tipo de solo onde é aplicado (SANCHOTENE et al., 2010). Porém, para controlar as principais gramíneas competidoras do arroz são necessárias doses superiores as usualmente aplicadas durante o ciclo da cultura, sendo que estas podem provocar fitotoxicidade no arroz, interferindo negativamente no desenvolvimento das plântulas pós-germinação e na emissão de perfilhos. Desta forma, é utilizado o dietholate, como protetor dessas sementes.

Tratando as sementes de arroz com o protetor dietholate, protegem-se as plântulas dos efeitos fitotóxicos do clomazone pela redução da atividade das enzimas mono-oxigenases que são inibidas por ele. Não sendo hidroxilado, o clomazone perde a capacidade herbicida, sendo conjugado com açúcares no citoplasma e carregado para os vacúolos das células por intermédio de carregadores de membrana do tonoplasto (FERHATOGLU et al., 2005).

Entretanto, com o lançamento de novas cultivares de arroz de alto potencial produtivo, tais como: Clearfield IRGA 424 RI, Guri INTA CL e Puitá INTA CL, tem sido verificado problemas na germinação e no vigor de sementes, atribuídos ao uso de dietholate. Estes problemas, não eram, até então, observados nas cultivares convencionais.

Nas últimas safras os rizicultores têm relacionado um aumento de efeitos estressores do dietholate, sobre sementes da cultivar Guri INTA CL, com o estresse por frio na época de semeadura/germinação (final de setembro até meados de outubro), devido à antecipação da mesma, com a intenção que a etapa reprodutiva coincida com a época maior intensidade de radiação solar (dezembro/janeiro), fazendo com que a ocorrência de temperaturas abaixo de 15 °C nos meses de setembro a outubro, no RS, ocorram na fase de semeadura/germinação do arroz. Resultando em uma menor porcentagem de germinação, atraso do desenvolvimento inicial das plantas, despigmentação das folhas, murchamento e baixa taxa de crescimento (YANG; DAI; ZHANG, 2012; SONG et al., 2011) das plântulas advindas de sementes tratadas com dietholate. Entretanto, há poucos estudos que demonstrem estas correlações aventadas. Para reduzir estes efeitos, produtos formulados contendo alguns minerais essenciais e fitohormônios, chamados de bioestimulantes (INOUE et al., 2012), tem sido utilizados.

O sucesso destes bioestimulantes, preconizados como reguladores da atividade metabólica em plantas, normalmente deve-se a elementos minerais como o silício (MAUAD et al., 2011) que é um estimulador enzimático (TAIZ et al., 2017) e pode interferir no crescimento e o desenvolvimento de plantas ao promover sinalização para produção de compostos antioxidantes: superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (ETESAMI et al., 2017). E através da estimulação da sinalização para produção de compostos osmoprotetores, tais como: prolina, glicina-betaína, entre outros (ETESAMI et al., 2017).

A tolerância de plantas a condições desfavoráveis, principalmente em relação ao frio, tem sido associada ao acúmulo de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, APX) na parte aérea, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta. E ao acúmulo de prolina, considerada como mecanismo do ajuste osmótico da planta, auxiliando na tolerância ao frio através da manutenção da integridade da membrana, evitando a desidratação celular provocada pela pressão osmótica (HUANG et al., 2012).

Desta forma, em função da aplicabilidade dos resultados, este estudo objetiva avaliar os possíveis efeitos benéficos do silício em mitigar estresses induzidos pelo tratamento de sementes de arroz com o protetor dietholate e intensificados pelo frio.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram desenvolvidos no Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais, durante o período de março à abril de 2018. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, os tratamentos com três repetições, arranjos em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 4 \times 2$: três temperaturas (5, 10 e 20 °C), duas cultivares (IRGA 424 RI e Guri INTA CL), dois tratamentos de semente (com e sem dietholate) quatro doses de Si (0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹) e duas fontes de Si (metassilicato de sódio (composição: Na₂O ≅ 28%; SiO₂ ≅ 27%; Fe ≅ 0,02%) e metassilicato de potássio (composição: N ≅ 3%; P₂O₅ ≅ 2%; K₂O ≅ 15%; SiO₂ ≅ 25%)).

As soluções de Si provenientes das duas fontes (metassilicato de sódio e metassilicato de potássio) foram preparadas nas doses de 0,0; 4,0; 8,0 e 16 mg L⁻¹ sendo diluídas em água destilada e o pH ajustado para 5,8±1.

As unidades experimentais foram placas de Petri (150 mm de diâmetro) com duas camadas de papel germitest pré-embebidas com 20 mL das diferentes doses de Si, contendo 20 sementes germinadas, por placa. As sementes foram tratadas e não tratadas com o protetor de sementes dietholate (Permit Star®) na dose de 6 mL por kg de sementes.

Previamente foi efetuada a padronização do tamanho das plântulas a serem submetidas às doses de Si, sendo que para isso, as sementes de arroz foram inoculados em placas de Petri pré-embebidas em água destilada e mantidas em câmara de crescimento por um período de 72 h, com fotoperíodo de 16 horas e temperatura de 25 °C ±1. Ao final deste período, as sementes que apresentaram 1,0 mm de radícula emitida foram transferidas para as placas de Petri e levadas para diferentes câmaras de germinação B.O.D., com fotoperíodo de 16 horas, reguladas para três temperaturas de 5, 10 e 20 °C, durante sete dias. Posteriormente, foram transferidas para sala de crescimento com fotoperíodo de 16 horas (R.F.A de ~73 μmol m⁻² s⁻¹) e temperatura de 25 °C ±1, permanecendo por mais sete dias.

Ao final destes, os dados do crescimento inicial das plântulas foram coletados, sendo que o comprimento, em centímetros, da radícula e da parte aérea foi mensurado com o auxílio de uma régua milimetrada.

Procedeu-se à análise de variância para as variáveis respostas, sendo os fatores analisados pelo teste de Tukey em nível de 0,05 de probabilidade de erro, exceto as doses de silício que foram ajustados modelos polinomiais, utilizando-se o programa estatístico Sisvar® 5.3 (FERREIRA, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As variáveis comprimento de parte aérea e comprimento radicular apresentaram interação significativa para todos os fatores (temperatura x cultivar x tratamento de semente x dose de Si x fonte de Si).

Ao avaliar o fator tratamento de semente dentro da variável comprimento da parte aérea é possível observar que plântulas de sementes tratadas com dietholate apresentaram, dos dezesseis tratamentos em combinações, para cada uma das três temperaturas 5, 10 e 20 °C, respectivamente, 87, 94 e 69% menor comprimento de parte aérea em comparação com as plântulas de sementes sem tratamento com dietholate (Tabela 1).

Efeitos deletérios causados pelo dietholate podem ser desencadeados por estresses de baixas temperaturas (ROSA et al., 2017). O dietholate pode induzir a inibição de enzimas antioxidantes, tais como: superóxido dismutase (SOD), a ascorbato peroxidase (APx), a glutational peroxidase (GPX), a catalase (CAT), a glutational S-transferase, peroxidases (não-específicas), a monodesidroascorbato redutase (MDHAR) e a desidroascorbato redutase (DHAR) (APEL; HIRT, 2004 SACANDALIOS, 2005) que retiram, neutralizam ou eliminam as espécies reativas de oxigênio (EROs) (SHAH et al., 2001). Durante uma condição de estresse, as plantas produzem EROs, estas, por sua vez, peroxidam lipídeos e interferem na divisão celular, atrasando ou reduzindo a germinação de sementes e/ou o vigor de plântulas (INOUE et al., 2012; ROSA et al., 2017), prolongando o ciclo da cultura, por aumentar o tempo para emergência, e por interferência na emissão de perfilhos, sendo um efeito indesejável.

Tabela 1 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, fontes e doses de silício para o fator tratamento de sementes. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	FONTE DE SILÍCIO	CULTIVAR	TRATAMENTO DE SEMENTE	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	0,27 b	0,89 b	0,54 b	0,19 b
			sem dietholate	0,97 a	1,99 a	2,48 a	1,26 a
		Irga 424RI	com dietholate	0,40 b	1,03 b	0,65 b	0,59 b
			sem dietholate	1,83 a	1,75 a	2,87 a	1,62 a
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	0,39 b	0,65 b	0,97 b	0,80 b
			sem dietholate	2,32 a	2,14 a	3,10 a	2,41 a
		Irga 424RI	com dietholate	2,70 a	1,64 b	1,83 b	0 b
			sem dietholate	3,097 a	3,25 a	3,26 a	4,17 a
10 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	0,31 b	0,89 b	0,76 b	0,46 b
			sem dietholate	1,87 a	3,09 a	2,81 a	1,36 a
		Irga 424RI	com dietholate	0,75 b	0,91 b	0,95 b	0,66 b
			sem dietholate	2,04 a	3,48 a	3,29 a	2,27 a
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	0,74 b	1,367 b	2,29 a	1,65 b
			sem dietholate	2,16 a	2,71 a	2,65 a	2,73 a
		Irga 424RI	com dietholate	1,06 b	1,23 b	2,68 a	1,32 b
			sem dietholate	2,26 a	3,16 a	3,28 a	2,67 a
20 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	1,05 b	2,08 b	1,24 b	0 b
			sem dietholate	2,91 a	3,98 a	3,81 a	3,087 a
		Irga 424RI	com dietholate	1,61 b	2,28 b	1,55 b	0 b
			sem dietholate	3,40 a	4,15 a	3,29 a	2,76 a
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	2,11 a	1,74 b	2,22 a	2,42 a
			sem dietholate	2,47 a	2,91 a	2,49 a	2,79 a
		Irga 424RI	com dietholate	1,72 b	2,67 a	2,16 b	2,19 a
			sem dietholate	3,10 a	2,83 a	3,06 a	2,75 a
CV (%)= 20,54							

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre os tratamentos de semente, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Para a análise de regressão entre doses de Si, na média do comprimento da parte aérea, observou-se que as duas cultivares foram influenciadas pelas doses de metassilicato de potássio. A cultivar Guri INTA CL tratada com dietholate (Figura 1c) demonstrou, em temperatura de 20 °C, um aumento quadrático no comprimento da parte aérea até a dose de 5,53 mg L⁻¹ de metassilicato de potássio, as demais temperaturas (5 e 10 °C) não obtiveram ajustes significativos de modelos polinomiais. As plântulas de sementes sem tratamento com dietholate, cultivar Guri INTA CL, sob temperatura de 5, 10 e 20 °C apresentaram um aumento quadrático no comprimento da parte aérea nas três temperaturas, com pontos de máxima nas doses 8,75, 7,54 e 12 mg L⁻¹ de metassilicato de potássio, respectivamente (Figura 1c).

As doses de Si na cultivar IRGA 424 RI, tratada com dietholate, suplementada com metassilicato de potássio e sob temperatura de 5 e 10 °C não apresentaram ajustes significativos de modelos polinomiais, já em temperatura de 20 °C, houve um ajuste quadrático com ponto de máxima na dose 6,12 mg L⁻¹ de metassilicato de potássio (Figura

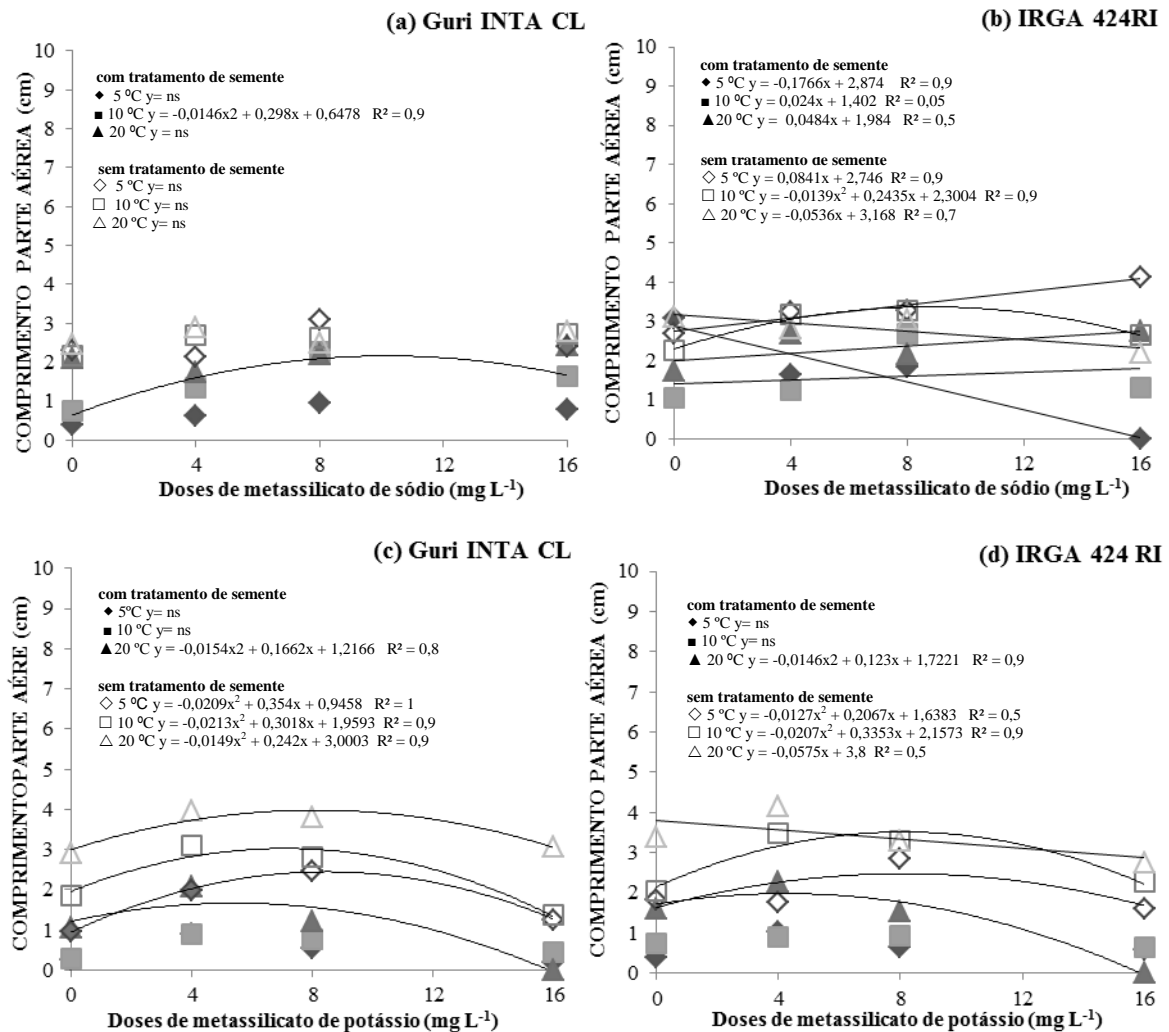
1d). Sem tratamento com dietholate, a cultivar IRGA 424 RI suplementada com metassilicato de potássio, sob temperatura 5 e 10 °C ajustou-se a um modelo polinomial quadrático com pontos de máximo comprimento de parte aérea nas doses 10 e 8,25 mg L⁻¹, e de forma linear negativa para a temperatura de 20 °C, proporcionando uma redução de 18,6%, no comprimento de parte aérea, das plântulas na dose mais alta de metassilicato de potássio (16 g L⁻¹), em relação as plantas que não foram suplementadas com Si (Figura 1d).

Para a análise de regressão entre doses de Si, da fonte metassilicato de sódio, observou-se que o comprimento da parte aérea da cultivar Guri INTA CL, sem tratamento de semente (Figura 1a), não foi significativo para as doses de metassilicato de sódio nas três temperaturas (5, 10 e 20 °C). Já as sementes tratadas com dietholate, cultivar Guri INTA CL e suplementada com metassilicato de sódio, sob temperatura de 10 °C houve um ajuste quadrático, com ponto de máxima na dose 9,6 mg L⁻¹, as temperaturas de 5 e 20 °C não apresentaram ajustes significativos de modelos polinomiais (Figura 1a).

As doses de metassilicato de sódio, sobre a média do comprimento da parte aérea da cultivar IRGA 424 RI tratada com dietholate e sob temperatura de 5 °C ajustou-se de forma linear negativa, com uma redução de 100% no comprimento da parte aérea com a adição de 16 mg L⁻¹ de metassilicato de sódio em relação às plantas não suplementadas com Si (0 mg L⁻¹). E de forma linear positiva para as temperaturas de 10 e 20 °C, com um aumento do comprimento da parte aérea de 31 e 59% respectivamente, na dose mais alta (16 g L⁻¹) de metassilicato de sódio em relação às plantas não suplementadas com Si (0 mg L⁻¹) (Figura 1b).

Para a cultivar IRGA 424 RI, sem tratamento de semente com dietholate, suplementada com metassilicato de sódio e sob temperatura de 10 °C, houve um ajuste quadrático, com ponto de máxima na dose 12 mg L⁻¹, já sob temperatura de 5 e 20 °C houve um aumento linear positivo e negativo respectivamente, com um aumento de 53% em 5°C e redução de 30% em 20 °C no comprimento da parte aérea, com a adição de 16 mg L⁻¹ de metassilicato de sódio em relação às plantas não suplementadas com Si (0 mg L⁻¹).

Figura 1 – Relação entre o comprimento da parte aérea das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, tratadas e não tratadas com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de silício de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.



De modo geral, o comprimento de parte aérea diminuiu nas duas cultivares de arroz quando em tratamento isolado com dietholate e aumentou quando associado ao silício, demonstrando que sementes de arroz tratadas isoladamente com o protetor dietholate acarretam em atrasos de crescimento inicial, mas quando associadas ao silício há um incremento no comprimento de parte aérea. De acordo com Rodrigues et al. (2011), plantas que crescem em ambiente rico em silício, diferem daquelas presentes em condições de deficiência, principalmente quanto à tolerância a fatores abióticos.

O Si é um dos elementos minerais que é citado como desencadeador da sinalização para a produção de enzimas antioxidantes (ASHRAF et al., 2010), a tolerância de plantas a condições desfavoráveis, principalmente relação ao estresse por frio, tem sido associada ao acúmulo de enzimas na parte aérea, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta, em função de estimular a sinalização para produção de compostos

osmoprotetores, tais como: prolina, glicina-betaína, poliálcoois, entre outros (ETESAMI et al., 2017). A glicina betaína, possui alta afinidade pela água (LOBATO et al., 2009), protege as membranas dos tilacóides, o que mantém a eficiência fotoquímica na fotossíntese (ASHRAF; FOOLAD, 2007). A prolina, como aminoácido e antioxidante não enzimático (ASHRAF; FOOLAD, 2007) atua, principalmente na osmoproteção (CAYLEY et al., 1992), na estabilização de proteínas e na proteção das membranas contra os efeitos deletérios das EROs (SHARMA; DUBEY, 2005) e no ajuste osmótico da planta, auxiliando na tolerância ao frio através da manutenção da integridade da membrana, evitando a desidratação celular provocada pela pressão osmótica (HUANG et al., 2012).

Em relação ao fator temperatura dentro da variável comprimento de parte aérea (Tabela 2), de modo geral, quanto maior a temperatura (20 °C), maior foi o comprimento de parte aérea das plântulas das sementes tratadas e não tratadas com dietholate. Entretanto, nas temperaturas 5 e 10 °C, onde o estresse foi severo, o comprimento da parte aérea das plântulas de sementes tratadas com dietholate foi menor em relação às não tratadas (Tabela 2), evidenciando que o protetor de semente, em temperaturas mais baixas (frio) amplifica seu efeito estressor e afeta a germinação e o desenvolvimento inicial das plantas, o que corrobora com as correlações aventadas no campo, pelos rizicultores. Desta forma, sementes de arroz tratadas com dietholate e semeaduras em períodos de menor temperatura do solo tendem a demonstrar maior atraso na emergência das plântulas e prejuízo na condução das lavouras.

O estresse por frio pode reduzir a taxa metabólica, pois o cloroplasto é diretamente afetado pela baixa temperatura, causando danos ao aparelho fotossintético e à molécula de clorofila (STHAPIT et al., 1995). Na fase de desenvolvimento vegetativo, o frio provoca redução no estabelecimento de plantas, taxa de desenvolvimento diário das folhas, perfilhamento, altura das plantas e baixa capacidade de competição do arroz em relação às plantas daninhas (FREITAS et al., 2008). De acordo com a Marschner (1995), o uso de silício torna-se particularmente interessante quando considerado como um antiestressor. O estresse causado pelas temperaturas extremas, por exemplo, pode ter um efeito menor com o uso de silício, sendo um estimulador de compostos osmoprotetores, que atuam no ajuste osmótico da planta, auxiliando na tolerância ao frio através da manutenção da integridade da membrana, evitando a desidratação celular provocada pela pressão osmótica (HUANG et al., 2012).

Tabela 2 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, sob diferentes cultivares, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator temperaturas. Santa Maria, RS, 2019.

DOSE DE SILÍCIO	TRATAMENTOS	FONTES DE SILÍCIO	CULTIVARES	TEMPERATURAS		
				5 °C	10 °C	20 °C
0 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,27 b	0,30 ab	1,05 a
			IRGA 424 RI	0,40 b	0,75 b	1,61 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,39 b	0,74 b	2,10 a
			IRGA 424 RI	3,09 a	1,06 b	1,72 b
	com dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,97 c	1,87 b	2,91 a
			IRGA 424 RI	1,83 b	2,04 b	3,40 a
sem dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,31 a	2,16 a	2,47 a	
		IRGA 424 RI	2,70 ab	2,26 b	3,10 a	
4,0 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,89 b	0,89 b	2,08 a
			IRGA 424 RI	1,02 b	0,91 b	2,28 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,64 b	1,37 ab	1,74 a
			IRGA 424 RI	1,64 b	1,23 b	2,67 a
	com dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	1,99 c	3,09 b	3,98 a
			IRGA 424 RI	1,75 b	3,48 a	4,15 a
sem dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,14 a	2,71 a	2,90 a	
		IRGA 424 RI	3,25 a	3,16 a	2,83 a	
8,0 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,53 a	0,76 a	1,23 a
			IRGA 424 RI	0,65 b	0,95 ab	1,55 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,97 b	2,22 a	2,29 a
			IRGA 424 RI	1,83 b	2,68 a	2,16 ab
	com dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,48 b	2,81 b	3,80 a
			IRGA 424 RI	2,87 a	3,29 a	3,29 a
sem dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	3,10 a	2,65 a	2,49 a	
		IRGA 424 RI	3,26 a	3,28 a	3,06 a	
16 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,19 a	0,46 a	0,00 a
			IRGA 424 RI	0,59 a	0,66 a	0,00 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,80 b	1,65 a	2,42 a
			IRGA 424 RI	0,00 c	1,32 b	2,74 a
	com dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	1,26 b	1,36 a	3,09 a
			IRGA 424 RI	1,62 b	2,27 ab	2,76 a
sem dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,41 a	2,73 a	2,79 a	
		IRGA 424 RI	4,13 a	2,70 b	2,19 b	

CV (%) 20,54

*Médias não seguidas por mesma letra na linha, diferem estatisticamente entre as temperaturas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Entre as cultivares, verificou-se que, de modo geral, que o comprimento da parte aérea das plântulas, dos dezesseis tratamentos em combinações, para cada uma das três temperaturas de 5, 10 e 20 °C, houve um aumento no comprimento de parte aérea das plântulas da cultivar IRGA 424 RI de 37, 6 e 6%, respectivamente, em relação à cultivar Guri INTA CL (Tabela 3). Possivelmente, porque a cultivar IRGA 424 RI é mais resistente às baixas temperaturas (SOSBAI, 2018), se adaptando melhor as condições mais frias.

Tabela 3 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, sob diferentes temperaturas, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator cultivares. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURAS	TRATAMENTO DE SEMENTE	FONTE DE SILÍCIO	CULTIVAR	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,27 a	0,87 a	0,54 a	0,19 a
			IRGA 424 RI	0,40 a	1,03 a	0,65 a	0,59 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,39 b	0,65 b	0,97 b	0,8 a
			IRGA 424 RI	3,10 a	1,64 a	1,83 a	0 b
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,97 b	1,99 a	2,48 a	1,26 a
			IRGA 424 RI	1,83 a	1,75 a	2,87 a	1,62 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,32 a	2,14 b	3,10 a	2,41 b
			IRGA 424 RI	2,70 a	3,25 a	3,26 a	4,13 a
10 ° C	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,31 a	0,89 a	0,76 a	0,46 a
			IRGA 424 RI	0,75 a	0,91 a	0,95 a	0,66 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,74 a	1,37 a	2,29 a	1,32 a
			IRGA 424 RI	1,06 a	1,23 a	2,68 a	1,65 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	1,87 a	3,09 a	2,81 a	1,36 b
			IRGA 424 RI	2,04 a	3,48 a	3,29 a	2,27 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,16 a	2,71 a	2,65 a	2,72 a
			IRGA 424 RI	2,26 a	3,16 a	3,28 a	2,67 a
20 ° C	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	1,05 a	2,08 a	1,24 a	0,00 a
			IRGA 424 RI	1,61 a	2,28 a	1,56 a	0,00 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,10 a	1,74 b	2,22 a	2,42 a
			IRGA 424 RI	1,72 a	2,67 a	2,16 a	2,75 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	2,91 a	3,98 a	3,81 a	3,09 a
			IRGA 424 RI	3,4 a	4,15 a	3,29 a	2,76 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	2,47 a	2,83 a	2,49 a	2,79 a
			IRGA 424 RI	3,10 a	2,83 a	3,06 a	2,18 a

CV (%)= 20,54

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre as cultivares, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A variável comprimento de parte aérea em relação às fontes de Si, observou-se, de maneira geral, que dos dezesseis tratamentos em combinações, para cada uma das três temperaturas de 5, 10 e 20 °C o metassilicato de sódio proporcionou um incremento no comprimento da parte aérea de 42, 42 e 25% respectivamente, em relação ao metassilicato de potássio (Tabela 4). O comprimento de plântulas é um importante parâmetro fisiológico, pois quanto maior a área foliar, maior será a área para captação de luz para realização do processo fotossintético (TAIZ; ZEIGER, 2012).

Essa diferença de comprimento da parte aérea entre as fontes, possivelmente, deve-se as diferentes composições de cada uma delas. A fonte metassilicato de sódio possui em sua composição ferro (Fe), que participa, em baixas concentrações, do processo antioxidante contra EROs, em associação com enzimas (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 1985) possuindo importante papel como componente de enzimas, envolvidas na transferência de elétrons (reações redox) (TAIZ et al., 2017).

Tabela 4 – Médias do comprimento da parte aérea de plântulas de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, tratamentos de semente e doses de silício para o fator fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURAS	TRATAMENTO DE SEMENTE	CULTIVAR	FONTE DE SILÍCIO	DOSES DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	0,39	0,65 a	0,97 a	0,80 a
			Metassilicato de potássio	0,27	0,89 a	0,54 b	0,19 a
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	3,09	1,64 a	1,83 a	0,00 b
			Metassilicato de potássio	0,40	1,03 a	0,65 b	0,59 a
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	2,32	2,14 a	3,10 a	2,41 a
			Metassilicato de potássio	0,97	1,99 a	2,48 a	1,26 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	2,70	3,25 a	3,27 a	4,13 a
			Metassilicato de potássio	1,83	1,75 b	2,87 a	1,62 b
10 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	0,74	1,37 a	2,27 a	1,65 a
			Metassilicato de potássio	0,31	0,89 a	0,76 b	0,46 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	1,06	1,23 a	2,68 a	1,32 b
			Metassilicato de potássio	0,75	0,91 a	0,95 b	0,66 a
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	2,16	2,71 a	2,65 a	2,72 a
			Metassilicato de potássio	1,87	3,09 a	2,81 a	1,36 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	2,26	3,16 a	3,28 a	2,67 a
			Metassilicato de potássio	2,04	3,48 a	3,29 a	2,267 a
20 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	2,10	1,74 a	2,22 a	2,42 a
			Metassilicato de potássio	1,05	2,08 a	1,24 b	0,00 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	1,72	2,28 a	2,17 a	2,75 a
			Metassilicato de potássio	1,61	2,28 a	1,57 a	0,00 b
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	2,47	2,91 b	2,49 b	2,79 a
			Metassilicato de potássio	2,91	3,98 a	3,81 a	3,09 a
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	3,10	2,83 b	3,06 a	2,19 a
			Metassilicato de potássio	3,39	4,15 a	3,29 a	2,76 a
CV (%)= 20,54							

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre as fontes de silício, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Ao avaliar o efeito do fator tratamento de semente na variável comprimento radicular, é possível observar que, de modo geral, as plântulas de sementes tratadas com dietholate apresentaram, dos dezesseis tratamentos em combinação, para as temperaturas de 5, 10 e 20 °C respectivamente, 81, 75 e 56% menor comprimento radicular em comparação com as plântulas de sementes sem tratamento com dietholate (Tabela 5). Isto ocorreu, possivelmente porque a cobertura das sementes com o protetor dietholate reduz a velocidade de absorção de água, a qual é indispensável para desencadear os processos metabólicos e bioquímicos da germinação, ocasionando desse modo uma redução do índice de velocidade de germinação e consecutivamente uma redução do comprimento radicular. Somando-se a isto, a ocorrência de frio no estabelecimento da cultura também ocasiona atraso no desenvolvimento de plântulas (MERTZ et al., 2009).

Tabela 5 – Médias do comprimento radicular de plântulas de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, fontes e doses de silício para o fator tratamento de sementes. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURAS	FONTE DE SILÍCIO	CULTIVAR	TRATAMENTOS DE SEMENTE	DOSES DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	0,42 a	0,87 b	0,76 b	0,11 a
			sem dietholate	0,95 a	2,42 a	2,41 a	0,23 a
		Irga 424RI	com dietholate	1,07 b	1,37 b	0,61 b	0,22 a
	sem dietholate		3,40 a	2,76 a	2,42 a	0,58 a	
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	0,98 b	1,20 b	1,8 b	1,34 b
			sem dietholate	3,15 a	3,07 a	4,09 a	4,54 a
Irga 424RI		com dietholate	2,15 b	0,00 b	0,00 b	0,00 b	
	sem dietholate	4,34 a	4,66 a	5,04 a	6,20 a		
10 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	0,39 b	1,40 b	0,93 b	0,29 a
			sem dietholate	3,69 a	4,99 a	3,17 a	0,81 a
		Irga 424RI	com dietholate	1,64 b	1,42 b	1,58 b	0,18 a
	sem dietholate		3,80 a	5,19 a	3,85 a	1,29 a	
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	1,67 b	2,51 b	3,02 a	3,38 b
			sem dietholate	4,03 a	4,15 a	3,71 a	5,02 a
Irga 424RI		com dietholate	1,96 b	3,51 a	3,63 b	1,17 b	
	sem dietholate	4,58 a	4,67 a	5,54 a	4,57 a		
20 ° C	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	com dietholate	2,24 a	3,35 b	2,06 b	0,00 b
			sem dietholate	3,58 a	5,21 a	3,70 a	1,65 a
		Irga 424RI	com dietholate	3,29 a	3,69 a	1,82 b	0,00 b
	sem dietholate		4,46 a	4,90 a	3,32 a	1,36 a	
	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	com dietholate	5,22 a	3,8,0 a	3,93 a	4,54 a
			sem dietholate	3,78 b	4,44 a	3,67 a	4,70 a
Irga 424RI		com dietholate	4,33 a	5,59 a	6,11 a	5,51 a	
	sem dietholate	4,10 a	4,04 b	4,71 b	3,89 b		

CV (%)= 26,51

*Médias não seguidas por mesma letra na coluna, diferem estatisticamente entre os tratamentos de semente, com e sem dietholate, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Na análise de regressão das doses de Si para as médias do comprimento radicular, verificou-se que, na cultivar Guri INTA CL com tratamento de semente com dietholate, o aumento das doses de metassilicato de potássio proporcionou, sob temperatura 20 °C, uma relação quadrática com ponto de máxima na dose 4,3 mg L⁻¹, as demais temperaturas (5 e 10 °C) não tiveram ajustes significativos de modelos polinomiais (Figura 2c). Já as sementes sem tratamento, da cultivar Guri INTA CL, o aumento das doses de metassilicato de potássio, nas temperaturas de 5, 10 e 20 °C, incrementou de forma quadrática o comprimento radicular, com pontos de máxima nas doses 7,2, 3,6 e 6,1 mg L⁻¹ (Figura 2c).

Para a cultivar IRGA 424 RI tratada com dietholate, a fonte metassilicato de potássio proporcionou um aumento quadrático na temperatura 20 °C com ponto de máxima na dose 3,5 mg L⁻¹, sob temperatura de 10 °C houve um aumento linear negativo, com uma redução do comprimento radicular de 100% na maior dose (16 mg L⁻¹) em relação às plantas não suplementadas com Si (0 mg L⁻¹), a temperatura de 5 °C não teve ajustes significativo de modelos polinomiais (Figura 1d). Sem tratamento com dietholate, a cultivar IRGA 424 RI, o aumento nas doses de metassilicato de potássio, incrementou de forma quadrática o comprimento radicular das plântulas, nas três temperaturas 5, 10 e 20 °C, com pontos de

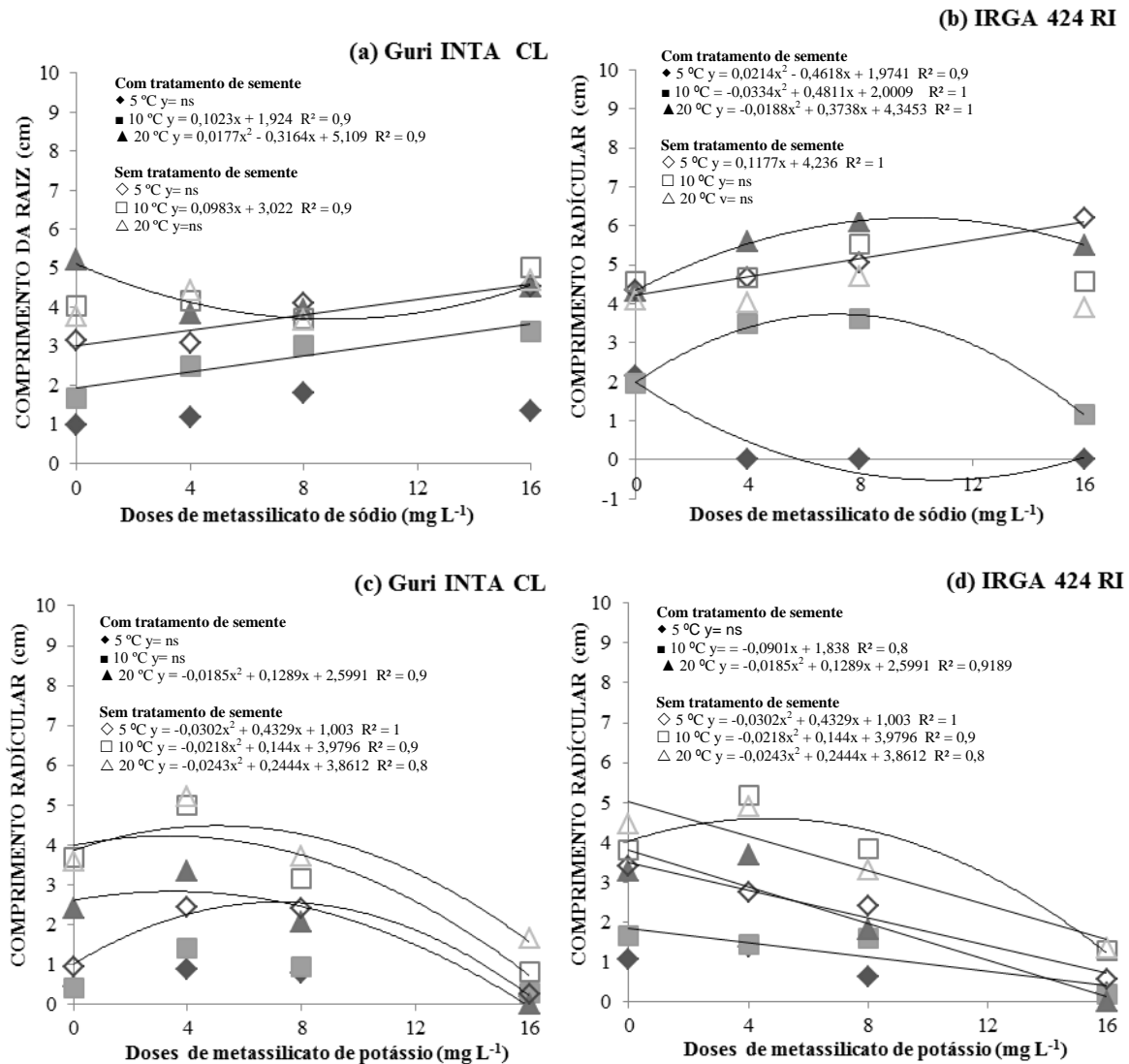
máxima nas doses 7,1, 3,6 e 6,1 mg L⁻¹ (Figura 1d).

Já para as doses de metassilicato de sódio, na cultivar IRGA 424 RI com tratamento de semente, existe uma relação quadrática sob as temperaturas de 5, 10 e 20, com pontos de máxima nas dose 11,5, 8, 12,3 mg L⁻¹ (Figura 1b). Sem tratamento de semente, a cultivar IRGA 424 RI, o aumento das doses de metassilicato de sódio incrementou de forma linear, com um aumento de 43% no comprimento radicular das plântulas sob temperatura de 5 °C. Nas temperaturas de 10 e 20 °C nenhum polinômio foi significativo (Figura 1b).

Para a cultivar Guri INTA CL com tratamento de semente, as doses de metassilicato de sódio proporcionaram um incremento linear sob temperatura de 10 °C , com um aumento de 103% no comprimento radicular das plântulas na maior dose (16 mg L⁻¹) em relação às plantas não suplementadas com Si (0 mg L⁻¹), em temperatura de 20 °C houve um aumento quadrático com ponto de máxima na dose 10,3 mg L⁻¹, e em temperatura de 5 °C, não teve ajuste significativo de modelos polinomiais (Figura 1a). Sem tratamento de semente com dietholate, a cultivar Guri INTA CL, sob temperatura de 10 °C, o aumento das doses de metassilicato de sódio proporcionou um aumento linear com um incremento de 24% no comprimento radicular das plântulas, na maior dose (16 mg L⁻¹) em relação às plantas não suplementadas com Si (0 mg L⁻¹). As demais temperaturas não tiveram ajustes significativos de modelos polinomiais (Figura 1a).

O comprimento de plântula é um importante parâmetro fisiológico, quanto maior as raízes, maior área para exploração e captação de nutrientes e água (TAIZ; ZEIGER, 2012). Os resultados encontrados no presente trabalho corroboram com os de Lima Filho et al., (2005), que em condições hidropônicas, cultivaram plantas de trigo em solução com 100 mg L⁻¹ de Si, e a adição de Si aumentou a biomassa da raiz.

Figura 2 – Relação entre o comprimento radicular das cultivares IRGA 424 RI e Guri INTA CL de arroz, com e sem tratamento de semente com dietholate, sob diferentes temperaturas e doses de silício de diferentes fontes, metassilicato de sódio e metassilicato de potássio. Santa Maria, RS, 2019.



Em relação ao fator temperatura para a média do comprimento radicular, é possível observar, de modo geral, que plântulas sem tratamento com dietholate não diferiram estatisticamente entre o comprimento radicular nas três temperaturas (5, 10 e 20°C) nem com a utilização do silício. Já para o comprimento radicular de plântulas tratadas com dietholate, observou-se que à medida que o estresse por frio aumentou, menor foi o comprimento radicular. Entretanto, à medida que as doses de silício aumentam esse comprimento de radícula deixa de diferir entre as temperaturas. Sugerindo-se, que os efeitos fitotóxicos do dietholate desencadeados pelo estresse por frio, que causavam uma diminuição no comprimento radicular, deixam de existir com o aumento das doses de Si, indicando que esse

elemento mineral é benéfico como mitigador de eventos estressores causados pela combinação de sementes tratadas com dietholate e baixas temperaturas, no que tange o crescimento de radícula pós-germinação (Tabela 6). Nesse contexto o uso do silício pode ser indicado com estratégia de redução de problemas em tratamento de sementes de arroz com dietholate.

Tabela 6 – Médias do comprimento radicular de plântulas de arroz, sob diferentes cultivares, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator temperaturas. Santa Maria, RS, 2019.

DOSES DE SILÍCIO	TRATAMENTOS DE SEMENTE	FONTES DE SILÍCIO	CULTIVARES	TEMPERATURAS		
				5 °C	10 °C	20 °C
0 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,42 b	0,39 b	2,40 a
			IRGA 424 RI	1,07 b	1,64 b	3,29 a
	sem dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,98 b	1,67 b	5,22 a
			IRGA 424 RI	2,15 b	1,96 b	4,33 a
		Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,95 b	3,69 a	3,58 a
			IRGA 424 RI	3,40 a	3,80 a	4,45 a
4,0 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	3,15 a	4,03 a	3,78 a
			IRGA 424 RI	4,34 a	4,58 a	4,10 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,87 b	1,40 b	3,35 a
			IRGA 424 RI	1,37 b	1,42 b	3,69 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	1,20 b	2,05 ab	3,83 a
			IRGA 424 RI	0,00 c	3,51 b	5,59 a
8,0 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	2,42 b	4,99 a	5,21 a
			IRGA 424 RI	2,76 b	4,90 a	5,19 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	3,07 a	4,15 a	4,47 a
			IRGA 424 RI	4,66 a	4,67 a	4,05 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	0,76 a	0,93 a	2,05 a
			IRGA 424 RI	0,61 a	1,58 a	1,82 a
16 (mg L ⁻¹)	com dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	1,80 b	3,02 ab	3,93 a
			IRGA 424 RI	0,00 c	3,64 b	6,11 a
	sem dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	2,41 a	3,17 a	3,70 a
			IRGA 424 RI	2,42 a	3,85 a	3,32 a
		Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	4,09 a	3,71 a	3,67 a
			IRGA 424 RI	5,04 a	5,54 a	4,71 a
CV (%)= 26,51	com dietholate	Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,11 a	0,29 a	0,00 a
			IRGA 424 RI	0,22 a	0,18 a	0,00 a
	sem dietholate	Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	1,34 b	3,39 a	4,54 a
			IRGA 424 RI	0,00 b	1,17 b	5,51 a
		Metassilicato de potássio	Guri INTA CL	0,23 a	0,81 a	1,65 a
			IRGA 424 RI	0,58 a	1,29 a	1,36 a
Metassilicato de sódio	Guri INTA CL	4,54 a	5,02 a	4,70 a		
	IRGA 424 RI	6,20 a	4,57 b	3,89 b		

*Médias não seguidas por mesma letra na linha, diferem estatisticamente entre as temperaturas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Entre o fator cultivar para a variável comprimento radicular, é possível observar, de

modo geral, que não houve diferença significativa entre as cultivares testadas (Tabela 7). Indicando ação do Si muito semelhante em ambas cultivares, possivelmente, devido a semelhança genética entre elas.

Tabela 7 – Médias do comprimento radicular de plântulas de arroz, sob diferentes temperaturas, tratamentos de semente, fontes e doses de silício para o fator cultivares. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	TRATAMENTOS DE SEMENTE	FONTE DE SILÍCIO	CULTIVAR	DOSE DE SILÍCIO (mg L ⁻¹)			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	com dietholate	Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	0,42 a	0,87 a	0,76 a	0,10 a
			IRGA 424 RI	1,07 a	1,37 a	0,61 a	0,22 a
		Metassilicato de Sódio	Guri INTA CL	0,98 a	1,20 a	1,8 a	1,34 a
	sem dietholate		IRGA 424 RI	2,15 a	0,00 a	0,00 b	0,00 b
		Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	0,95 b	2,42 a	2,41 a	0,23 a
			IRGA 424 RI	3,4 a	2,76 a	2,42 a	0,58 a
10 ° C	com dietholate	Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	3,15 a	3,07 b	4,09 a	4,54 b
			IRGA 424 RI	4,34 a	4,66 a	5,04 a	6,20 a
		Metassilicato de Sódio	Guri INTA CL	0,39 b	1,40 a	0,93 a	0,29 a
	sem dietholate		IRGA 424 RI	1,64 a	1,42 a	1,58 a	0,18 a
		Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	1,67 a	2,51 a	3,02 a	3,39 a
			IRGA 424 RI	1,96 a	3,51 a	3,63 a	1,17 b
20 ° C	com dietholate	Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	3,69 a	4,99 a	3,17 a	0,81 a
			IRGA 424 RI	3,80 a	5,19 a	3,85 a	1,29 a
		Metassilicato de Sódio	Guri INTA CL	4,03 a	4,15 a	3,71 b	4,57 a
	sem dietholate		IRGA 424 RI	4,58 a	4,67 a	5,54 a	5,02 a
		Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	2,40 a	3,35 a	2,06 a	0,00 a
			IRGA 424 RI	3,29 a	3,69 a	1,82 a	0,00 a
20 ° C	com dietholate	Metassilicato de Sódio	Guri INTA CL	5,22 a	3,83 b	3,93 b	4,54 a
			IRGA 424 RI	4,33 a	5,59 a	6,11 a	5,51 a
		Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	3,58 a	5,20 a	3,70 a	1,36 a
	sem dietholate		IRGA 424 RI	4,46 a	4,90 a	3,32 a	1,65 a
		Metassilicato de Potássio	Guri INTA CL	3,78 a	4,44 a	3,77 a	4,70 a
			IRGA 424 RI	4,10 a	4,05 a	4,71 a	3,89 a

CV (%)= 26,51

*Médias seguidas de mesma letra na coluna, para a mesma variável, não diferem estatisticamente entre as cultivares, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

Com relação ao fator fonte de Si, para a variável comprimento radicular, os resultados apresentaram uma relação de proporcionalidade com os do comprimento de parte aérea, onde a fonte metassilicato de sódio proporcionou maior resistência ao frio e um aumento no comprimento radicular de 42, 50 e 67% para as temperaturas de 5, 10 e 20 °C respectivamente, nas plântulas de sementes tratadas e não tratadas com dietholate, em comparação com a fonte metassilicato de potássio (Tabela 8). Isso se deve, possivelmente, as diferentes composições de cada uma das fontes. A fonte metassilicato de sódio possui em sua composição ferro (Fe), que participa, em baixas concentrações, do processo antioxidante contra EROs, em associação com enzimas (HALLIWELL; GUTTERIDGE, 1985) e possuindo importante papel como componente de enzimas, envolvidas na transferência de elétrons (reações redox) (TAIZ et al., 2017).

Tabela 8 – Médias do comprimento radicular de plântulas de arroz, sob diferentes temperaturas, cultivares, tratamentos de semente e doses de silício para o fator fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.

TEMPERATURA	TRATAMENTO DE SEMENTE	CULTIVAR	FONTE DE SILÍCIO	DOSE DE SILÍCIO			
				0	4,0	8,0	16
5 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	0,98	1,20 a	1,80 a	1,34 a
			Metassilicato de potássio	0,42	0,87 a	0,76 a	0,11 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	2,15	0,00 b	0,00 a	0,00 a
			Metassilicato de potássio	1,07	1,37 a	0,61 a	0,22 a
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	3,15	3,07 a	4,09 b	4,54 a
			Metassilicato de potássio	0,95	2,42 a	2,41 a	0,23 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	4,34	4,66 a	5,04 a	6,20 a
			Metassilicato de potássio	3,40	2,75 b	2,41 b	0,58 b
10 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	1,67	1,40 a	3,02 a	3,39 a
			Metassilicato de potássio	0,39	2,50 a	0,93 b	0,29 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	1,96	3,51 a	3,63 a	1,17 a
			Metassilicato de potássio	1,64	1,42 b	1,58 b	0,18 a
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	4,3	4,15 a	3,71 a	5,02 a
			Metassilicato de potássio	3,69	4,99 a	3,17 a	0,81 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	4,58	4,67 a	5,54 a	4,57 a
			Metassilicato de potássio	3,80	5,19 a	3,85 a	1,29 b
20 ° C	com dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	5,22	3,83 a	3,93 a	4,54 a
			Metassilicato de potássio	2,40	3,35 a	2,06 b	0,00 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	4,33	5,58 a	6,10 a	5,51 a
			Metassilicato de potássio	3,29	3,69 b	1,82 b	0,00 b
	sem dietholate	Guri INTA CL	Metassilicato de sódio	3,78	4,43 a	3,67 a	4,70 a
			Metassilicato de potássio	3,58	5,21 a	3,70 a	1,65 b
		Irga 424RI	Metassilicato de sódio	4,10	4,05 a	4,71 a	3,89 a
			Metassilicato de potássio	4,46	4,90 a	3,32 b	1,36 b
CV (%)= 26,51							

*Médias seguidas de mesma letra na coluna, para a mesma variável, não diferem estatisticamente entre as fontes de silício, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$).

CONCLUSÃO

O tratamento de sementes com dietholate interferiu de forma negativa no comprimento de parte aérea e radícula, quanto mais baixa a temperatura, maiores foram os efeitos negativos do dietholate.

A fonte de Si metassilicato de sódio, foi mais eficiente no aumento do comprimento da parte aérea e radícula.

Portanto, o Si atenua o estresse por baixas temperaturas em plântulas de arroz tratadas com dietholate.

REFERÊNCIAS

ASHRAF, M. Inducing drought tolerance in plants: recent advances. *Biotechnol Adv.* 28(1). p.169-183. 2010.

BEGON, M.; HARPER, J.L.; TOWNSEND, C.R. *Ecology, individuals, populations and communities*. Oxford: Blackwell, 1986.

CAYLEY S., LEWIS B.A, RECORD J.R., 1992. Origins of the osmoprotective properties of betaine and proline in *Escherichia coli* K-12. *J. Bacteriol* 175: 1586-1595.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). *Acomp. safra bras. grãos*, v. 6 Safra 2018/19 - Sexto levantamento, Brasília, p. 1-69 março 2019.

EMATER. (2019) - *Empresa Brasileira para a Pesquisa Agropecuária. Estimativa de safra para grãos de verão*. Disponível em: <<http://www.emater.rs.gov.br>. Acesso em 21

ETESAMI, H.; JEONG, B.R; Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. V. 147. p.881-896. 2017.

FERHATOGLU, Y., AVDIUSHKO, S., BARRET, M.. The basic for safening of clomazone by phorate insecticide in cotton and inhibitors of cytochrome P450s. *Pestic. Biochem. Physiol.*, v. 81, n. 1, p. 59-70. 2005.

FERREIRA, A.G.; AQUILA, M.E.A. Alelopatia: uma área emergente da ecofisiologia vegetal. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v.12, n.1, p.175-204, 2000.

FREITAS, T. F. S.; SILVA, P. R. F.; MARIOT, C. H. P.; MENEZES, V. G.; ANGHINONI, I.; YANG, Q.; WANG, Y.; ZHANG, J.; SHI, W.; QIAN, C. & PENG, X. Identification of aluminum-responsive proteins in rice roots by a proteomic approach: Cysteine synthase as a key player in Al response. *Proteomics*, 7: 737-749, 2007.

BREDEMEIER, C.; VIEIRA, V. M. Produtividade de arroz irrigado e eficiência da adubação nitrogenada influenciadas pela época de semeadura. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, MG, v.32, n.6, p.2397-2405, 2008.

HALLIWELL, B. e GUTTERIDGE, J.M. *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford University Press. Oxford, UK. Third Edition, 1999.

HUANG, J.; SUN, S.; XU, D.; LAN, H.; SUN, H.; WANG, Z. et al. A TFIIIA-type zinc finger protein confers multiple abiotic stress tolerances in transgenic rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Mol Biol*, v. 80, p. 337–350, 2012.

INOUE, M.H.; ARAÚJO, T.D.C; MENDES, K.F; BEN,R; CONCIANI, P.A.. Eficiência do dietholate e bioestimulantes isolados e associados no tratamento de sementes de algodoeiro adensado com clomazone aplicado em pré-emergência. *Revista de Ciências Agro-ambientais*. V.10; n.2, p. 163-172, Alta Floresta, 2012.

LOBATO A.K.S., COSTA R.C.L., NETO M.A.M., OLIVEIRA NETO C.F., SANTOS FILHO B.G., ALVES G.A.R., COSTA K.C., SILVA L.I., CONRADO T.V., MALEIA M.P.. Consequences of the water deficit on nitrogen compounds in pepper (cv. Vermelho gigante) plants. *Res J Biol Sci* 4: 760-764. ISSN: 1815-8846. 2009.

MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants. Academic*. London. 1995. 889p.
Matichenkov VV, Kosobrukhov AA, Shabnova NI; Bocharnikova EA (2005) Plant response to silicon fertilizers under salt stress.

MAUAD, M; CRUSCIOL, C.A.C; FILHO, H.G. produção de massa seca e nutrição de arroz de terras altas sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada. *Semina*. V. 32, n.3, p.939-948. Londrina, 2011.

MERTZ, L.; HENNING, F. A.; SOARES, R. C.; BALDIGA, R. F.; PESKE, F. B.; DE MORAES, D. M. Alterações fisiológicas em sementes de arroz expostas ao frio na fase de germinação. *Revista Brasileira de Sementes*, v.31, v.2, 2009.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. *Informações Agronômicas*, Piracicaba, n. 134, p. 14-20, 2011.

ROSA, T.D; HELGUEIRA, D.B; ALMEIDA, A.S; SOARES, V.N.; MATTOS, F.P; MEDEIROS, D.C. vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com dietholate isolado e em combinação em duas temperaturas. *Tecnol. & Ciência Agropecuária*. V.11, n.2, p.59-62; João Pessoa. 2017.

MEDEIROS, D.C. vigor de sementes de arroz irrigado tratadas com dietholate isolado e em combinação em duas temperaturas. *Tecnol. & Ciência Agropecuária*. V.11, n.2, p.59-62; João Pessoa. 2017.

RUTLEDGE, J.S.; TALBERT, R.E.; DALDWIN, F.L.; WEBSTER, E.P.; SCHMIDT, L.A. Clomazone for weed control in rice. In: RICE TECHNICAL WORKING GROUP, 27, 1998, Reno, USA. *Proceedings...* College Station: The Texas Agricultural Experiment Station, 1998. p.213-214.

SANCHOTENE D.M; KRUSE, N.D.; AVILA, L.A.; MACHADO, S.L.O; NICOLODI, G.A.; DORNELLES, S.H.B.D Efeito do protetor dietholate na seletividade de clomazone em cultivares de arroz irrigado. *Planta Daninha*. V. 28, n.2, p.339-346. Viçosa. 2010.

SHARMA, P., DUBEY, R.S., 2005. Modulation of nitrate reductase activity in rice seedlings under aluminium toxicity and water stress: role of osmolytes as enzyme protectant. *Journal of Plant Physiology*, v. 162, p. 854-862.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Pelotas: SOSBAI, 2017. 164p

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. *Arroz irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Farroupilha: SOSBAI, 2018. 10 p.

SONG, S. Y.; CHEN, Y.; CHEN, J.; DAI, X. Y.; ZHANG, W. H. Physiological mechanisms underlying OsNAC5-dependent tolerance of rice plants to abiotic stress. *Planta*, v. 234, p. 331-345, 2011.

STHAPIT, B.R.; WITCOMBE, J.R.; WILSON, J.M. Methods of selection for chilling tolerance in Nepalese rice by chlorophyll fluorescence analysis. *Crop Science*, Madison, v.35, n.1, p.90-94, 1995.

TAIZ L , ZEIGER E, MOLLER I. M., MURPH A, *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. 6^a ed. Artmed Editora S.A., 2017. 120p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. 5^a ed. Porto Alegre, Artmed. 2012. 95p

7. CONCLUSÃO GERAL

No Rio Grande do Sul, os agricultores sofrem quase o ano todo com algum tipo de estresse, seja com o frio pela queda brusca de temperatura, a seca causada pela falta de chuvas e a precariedade na irrigação das plantações brasileiras ou por plantas daninhas que são um dos principais fatores limitantes da alta produtividade. Todos estes problemas geram grandes prejuízos e podem até acabar com a lavoura. Os resultados da ação do silício como atenuador desses estresses, evidenciadas nessa pesquisa, foram:

O índice de clorofila *a* e *b*, a área foliar e o teor de massa seca da parte aérea e raiz aumentaram com o aumento das doses de Si nas três condições hídricas do solo.

Houve um aumento na atividade das enzimas superóxido dismutase e guaiacol peroxidase nas cultivares estudadas à medida que as doses de Si aumentaram, diminuindo os danos oxidativos em nível celular, causados pela restrição hídrica.

O processo germinativo das sementes de arroz, o índice e velocidade de germinação (IVG) e o comprimento de parte aérea e radícula, foi influenciado negativamente pelo tratamento de semente com dietholate, principalmente em temperatura de 5 e 10 °C.

A cultivar IRGA 424 RI foi mais resistente ao estresse por baixas temperaturas e aos efeitos fitotóxicos do protetor dietholate.

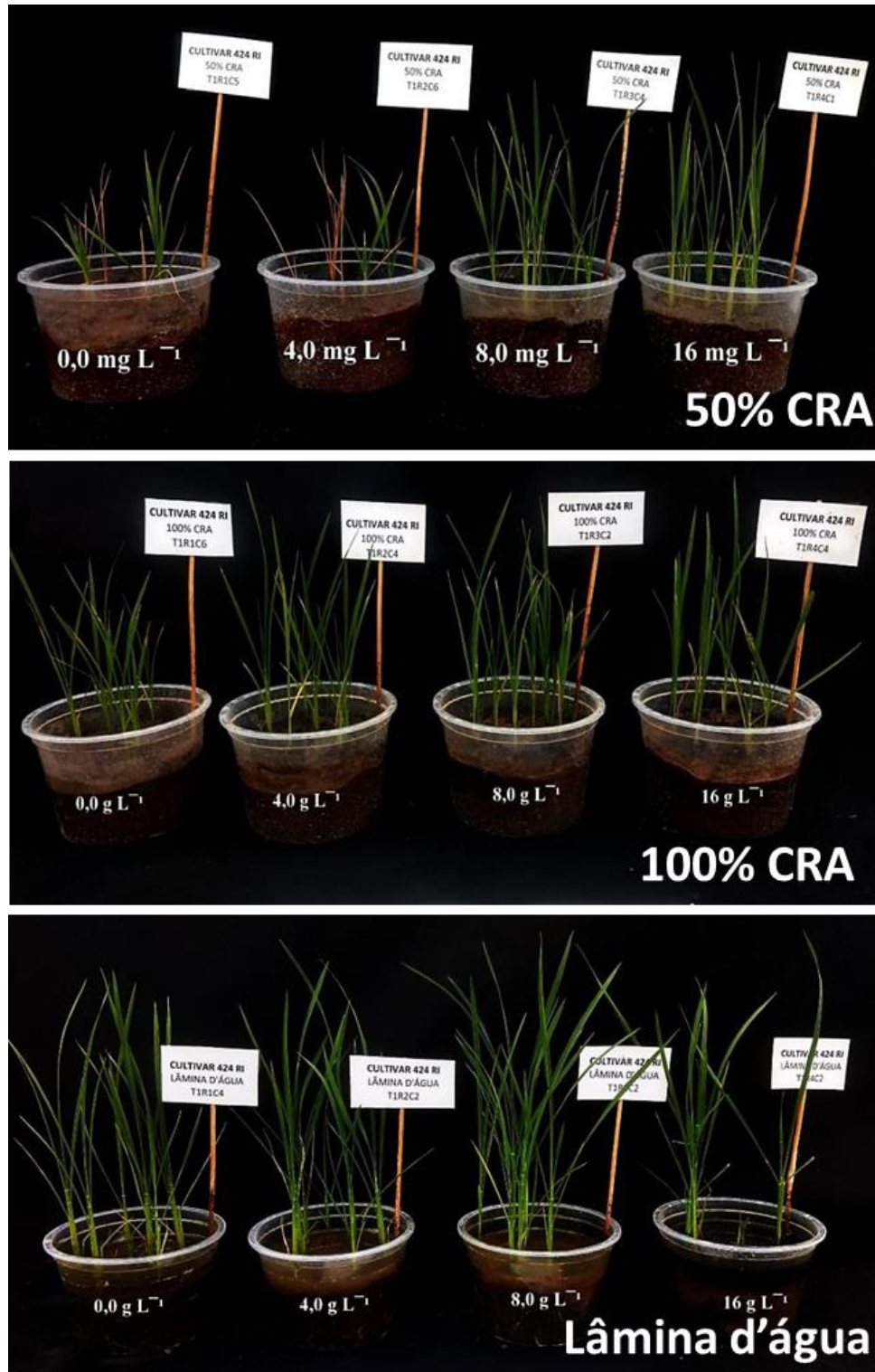
A fonte de Si metassilicato de sódio foi mais eficiente para o aumento do percentual de germinação, IVG e comprimento de parte aérea e radícula, de sementes tratadas e não tratadas com dietholate.

Portanto, o Si atenua o estresse por déficit hídrico e por frio em sementes de arroz tratadas com dietholate.

A partir desses resultados é possível inferir que o uso do silício é algo a se considerar, sendo ele uma tecnologia verde, como uma possível solução para amenizar de forma considerável os estresses hídricos, por baixas temperaturas ou pelo protetor dietholate nas plantas de arroz.

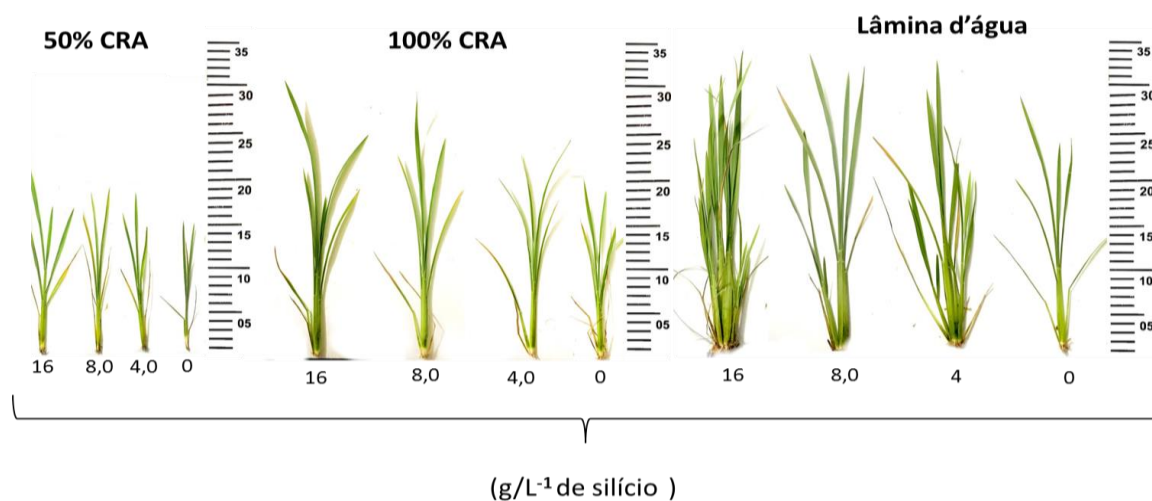
ANEXO A – Fotos do capítulo I

Parte aérea de plantas de arroz sob diferentes condição hídrica do solo (50, 100 % da CRA e Lâmina d'água) e doses de silício. Santa Maria, RS, 2019.



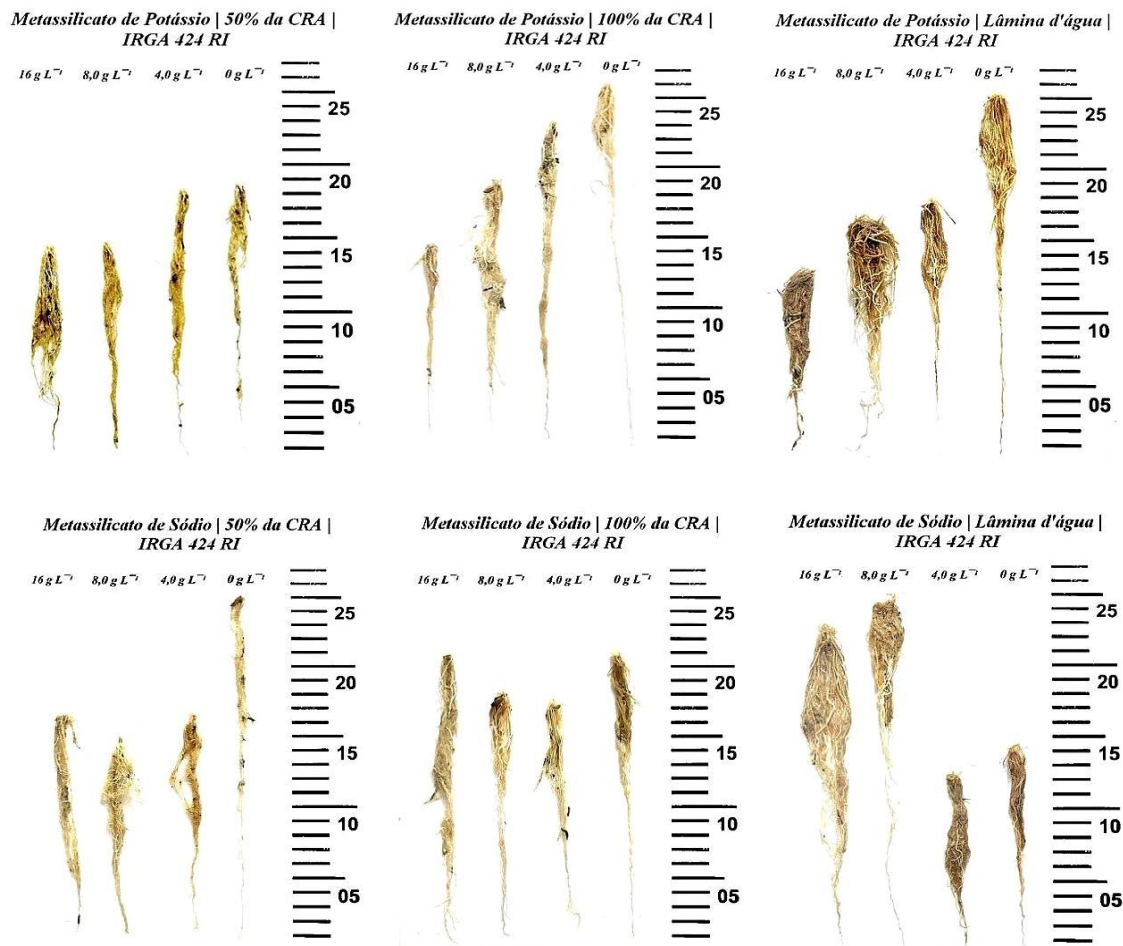
FONTE: CASSOL, J., 2019.

Parte aérea de plantas de arroz sob diferentes condição hídrica do solo (50, 100 % da CRA e Lâmina d'água) e doses de silício. Santa Maria, RS, 2019.



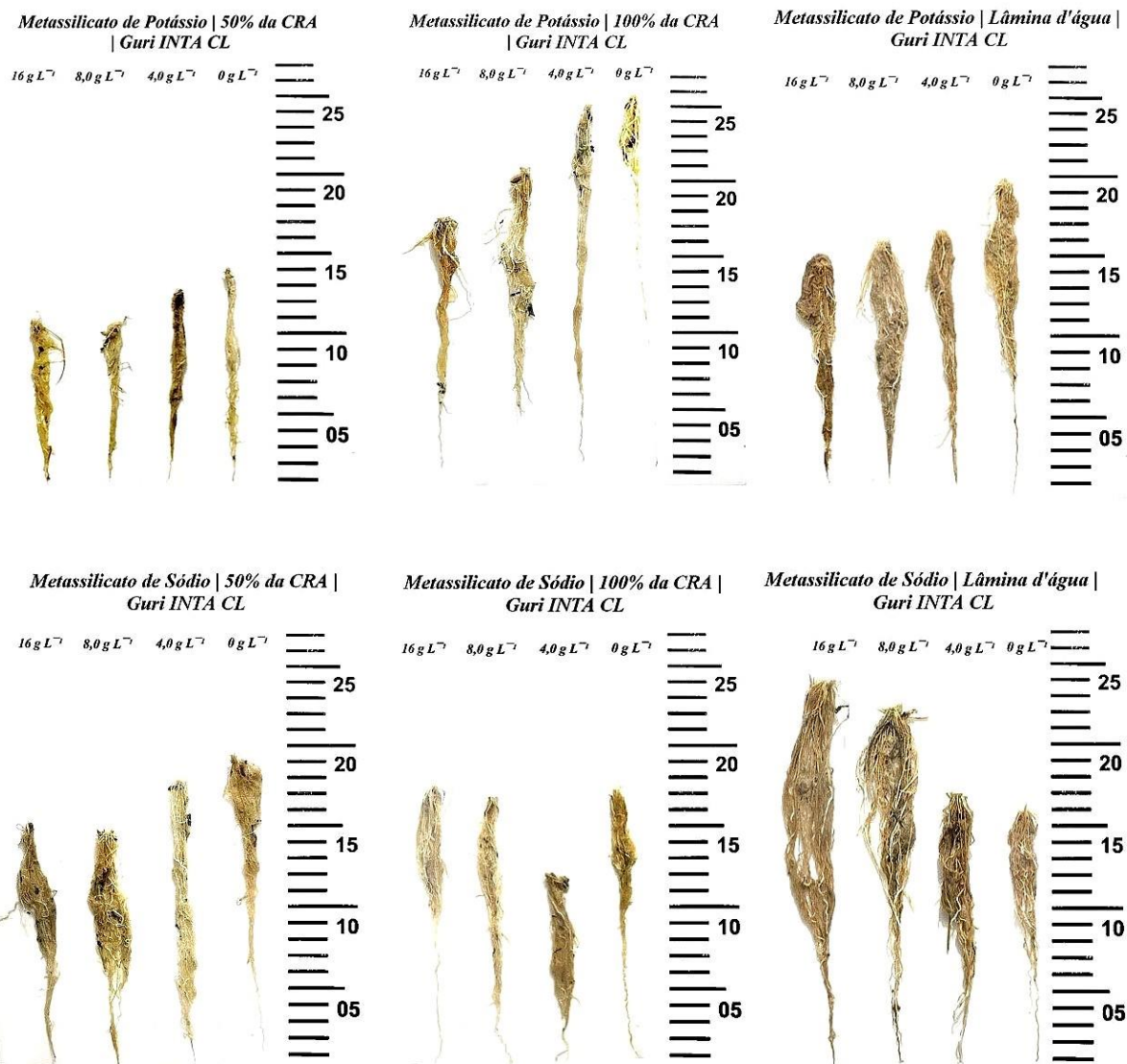
FONTE: CASSOL, J., 2019.

Raízes de arroz cultivar IRGA 424 RI sob diferentes condições hídricas do solo (50, 100 % da CRA e Lâmina d'água), doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



FONTE: CASSOL, J., 2019.

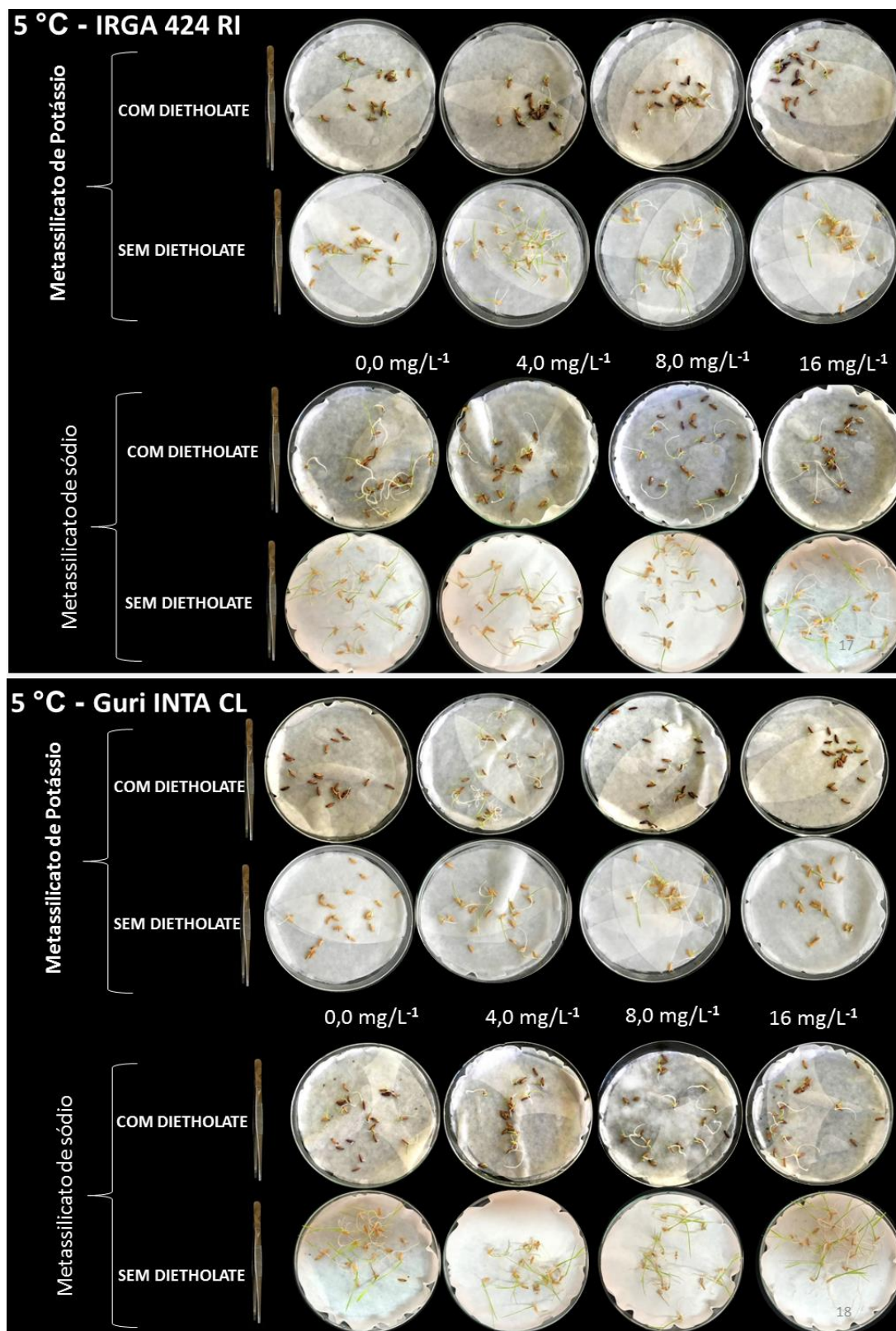
Raízes de arroz cultivar Guri INTA CL sob diferentes condições hídricas do solo (50, 100 % da CRA e Lâmina d'água), doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



FONTE: CASSOL, J., 2019.

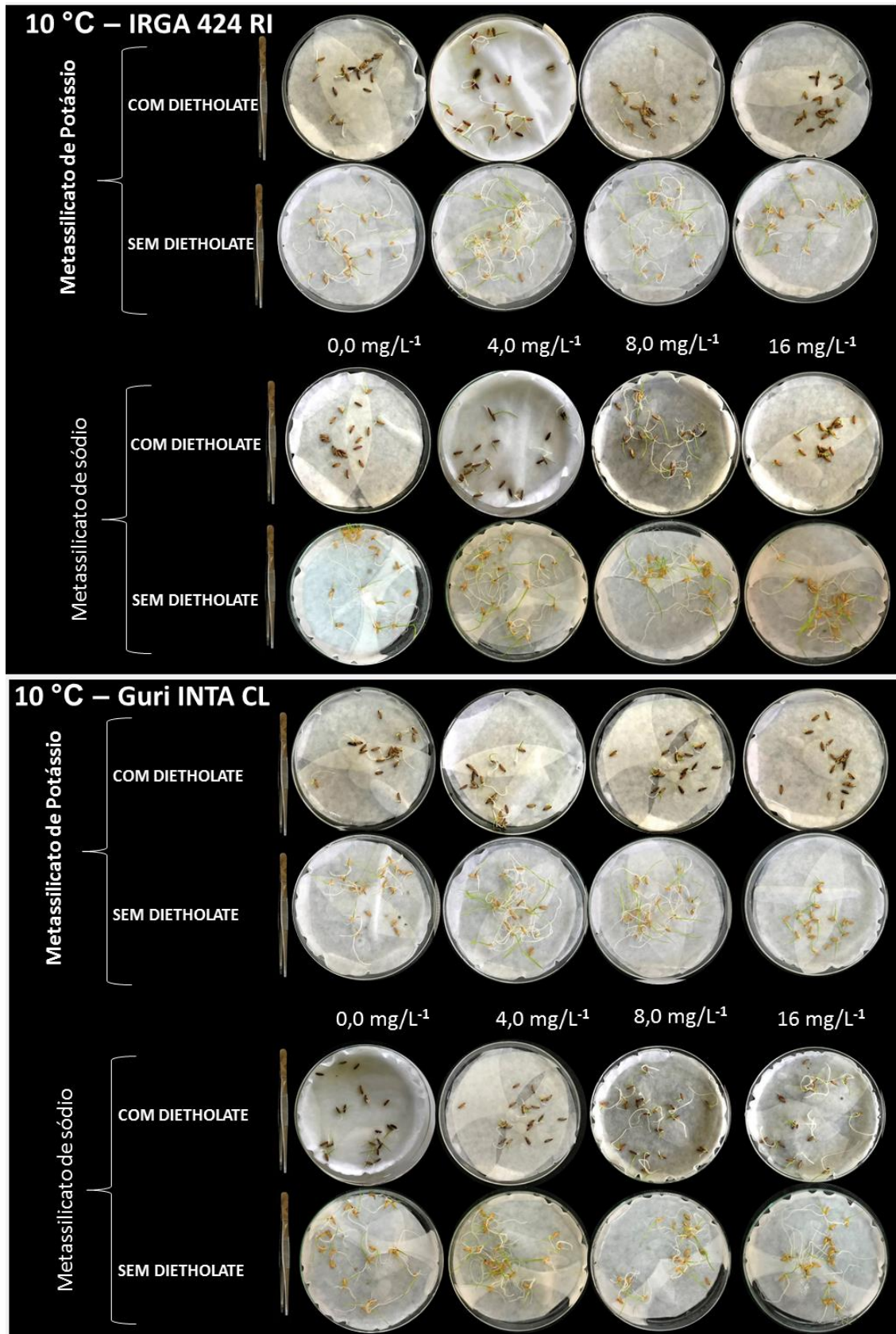
ANEXO B – Fotos do capítulo II

Porcentagem de germinação de sementes de arroz, cultivar IRGA 424 e Guri INTA CL, tratadas e não tratadas com dietholate, sob temperatura de 5 °C e suplementadas com diferentes doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



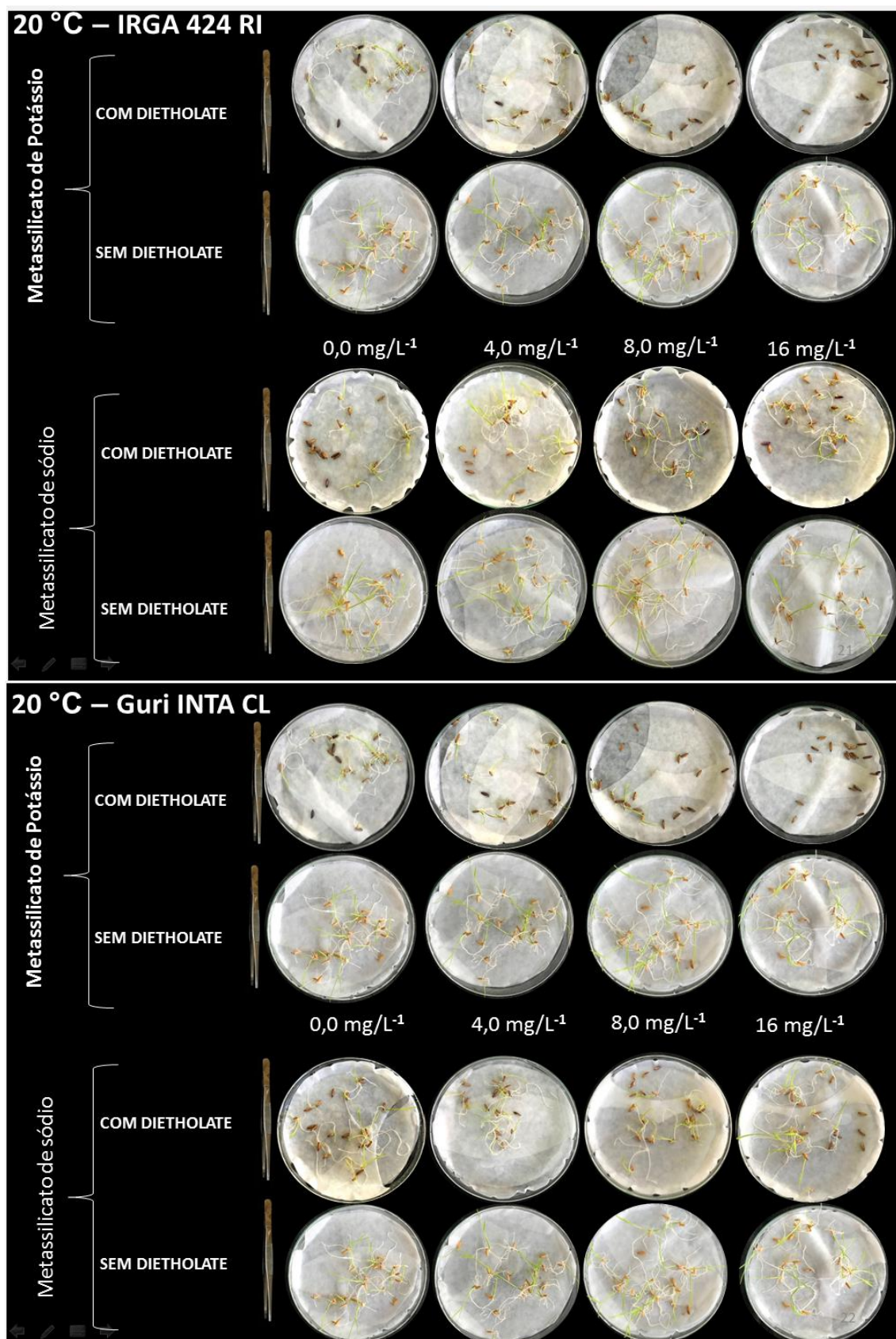
FONTE: CASSOL, J., 2019.

Porcentagem de germinação de sementes de arroz, cultivar IRGA 424 e Guri INTA CL, tratadas e não tratadas com dietholate, sob temperatura de 10 °C e suplementadas com diferentes doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



FONTE: CASSOL, J., 2019.

Porcentagem de germinação de sementes de arroz, cultivar IRGA 424 e Guri INTA CL, tratadas e não tratadas com dietholate, sob temperatura de 20 °C e suplementadas com diferentes doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



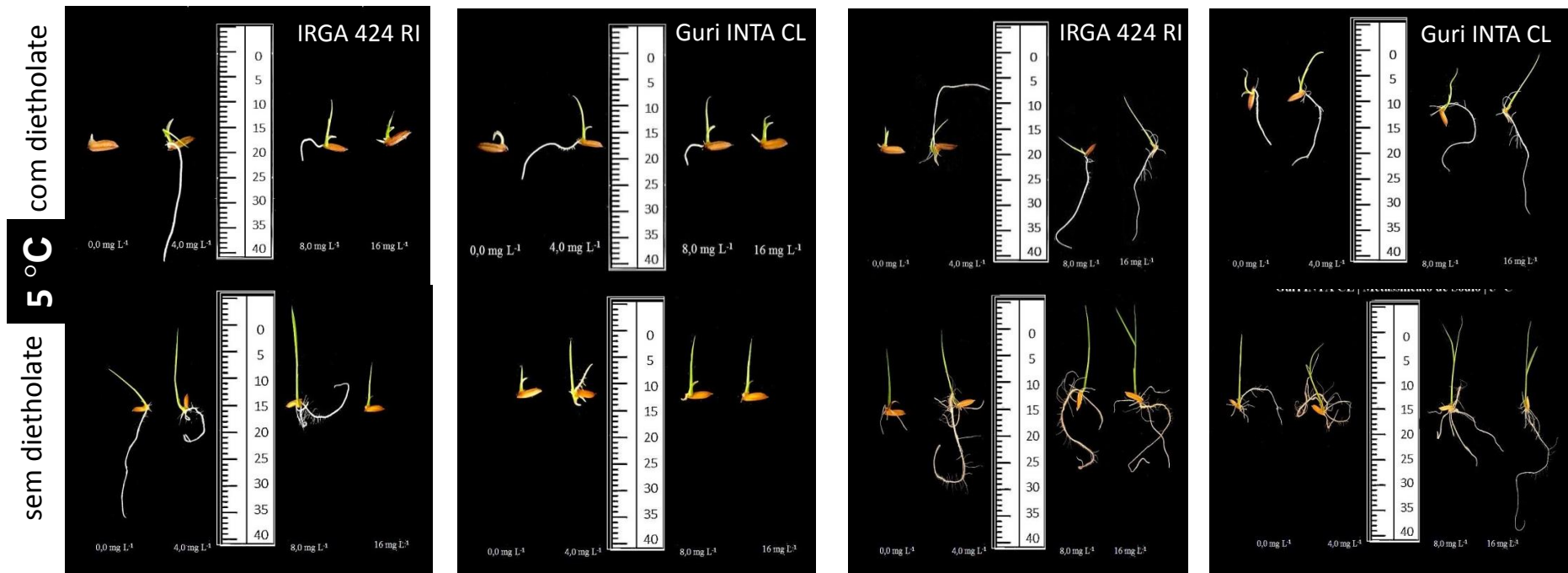
FONTE: CASSOL, J., 2019.

ANEXO C – Fotos do capítulo III

Comprimento da parte aérea e radícula de plântulas tratadas e não tratadas com dietholate sob temperatura de 5 °C e suplementadas com diferentes doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.

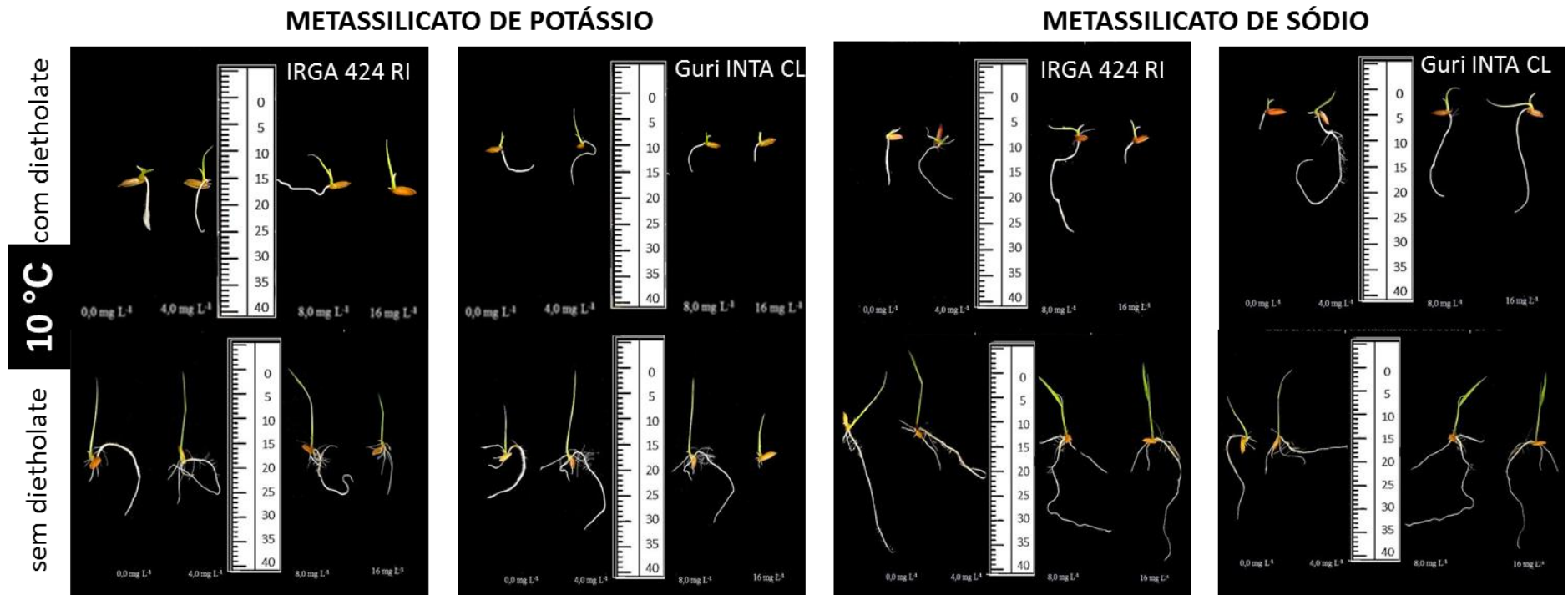
METASSILICATO DE POTÁSSIO

METASSILICATO DE SÓDIO



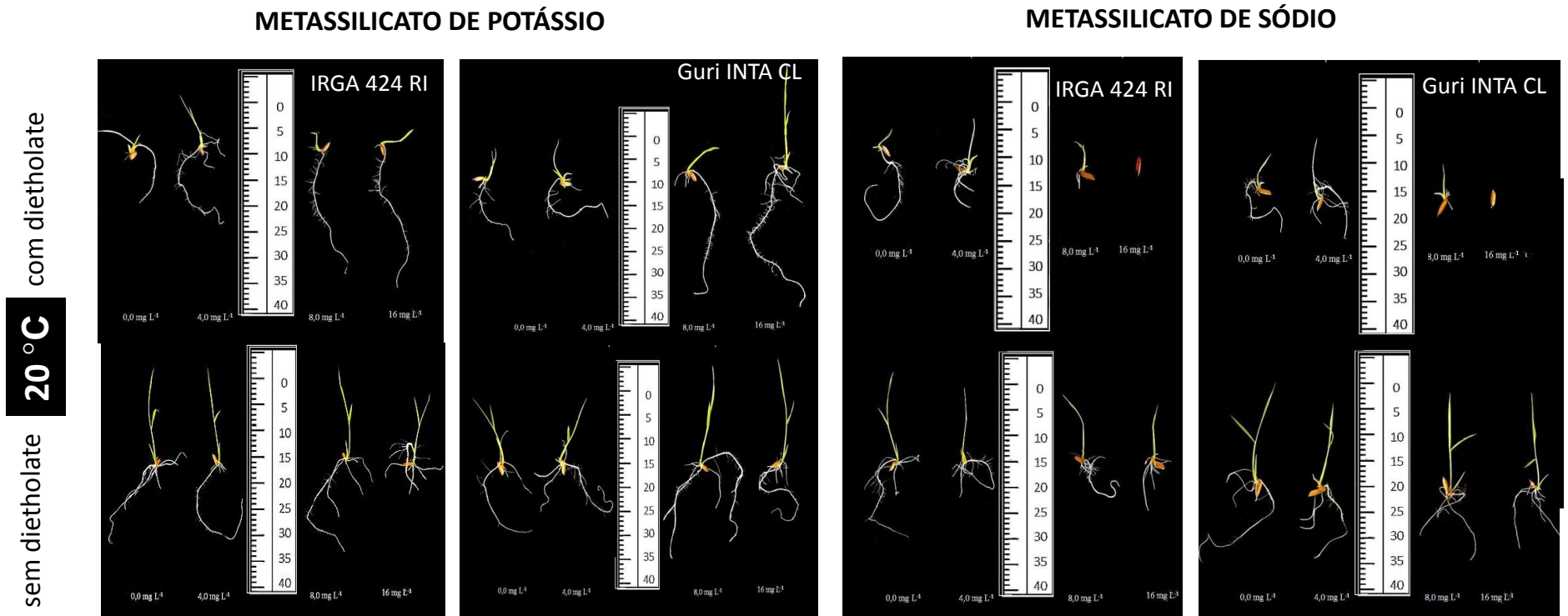
FONTE: CASSOL, J., 2019

Comprimento da parte aérea e radícula de plântulas tratadas e não tratadas com dietholate sob temperatura de 10 °C e suplementadas com diferentes doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



FONTE: CASSOL, J., 2019

Comprimento da parte aérea e radícula de plântulas tratadas e não tratadas com dietholate sob temperatura de 20 °C e suplementadas com diferentes doses e fontes de silício. Santa Maria, RS, 2019.



FONTE: CASSOL, J., 2019.