

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel

Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade



Dissertação

**Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas de cevada supridas com
silício e tratadas com fungicida contra *Bipolaris sorokiniana***

Tailine Manske Holz

Pelotas, 2021

Tailine Manske Holz

Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas de cevada supridas com silício e tratadas com fungicida contra *Bipolaris sorokiniana*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área de conhecimento: Fitossanidade).

Orientador: Prof. Dr. Leandro José Dallagnol

Coorientador: Dr. Keilor da Rosa Dorneles

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

H762a Holz, Tailine Manske

Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas de cevada supridas com silício e tratadas com fungicida contra *Bipolaris sorokiniana* / Tailine Manske Holz ; Leandro José Dallagnol, orientador ; Keilor da Rosa Dorneles, coorientador. — Pelotas, 2021.

100 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Mancha marrom. 2. Adubação silicatada. 3. Fungicida preventivo. 4. Mecanismos de defesa. 5. Pigmentos fotossintéticos. I. Dallagnol, Leandro José, orient. II. Dorneles, Keilor da Rosa, coorient. III. Título.

CDD : 631.8

Banca examinadora:

Jonas Alberto Rios, Dr.
(Universidade Federal Rural de Pernambuco)

Aloísio Alcantara Vilarinho, Dr.
(Embrapa Trigo)

Jerônimo Vieira de Araújo Filho, Dr.
(Universidade Federal de Pelotas)

Leandro José Dallagnol, Dr. (Orientador)
(Universidade Federal de Pelotas)

Aos meus pais Lóia e Ildemar,

Ao meu irmão Natan.

Pelo apoio, carinho e incentivo em todos os
momentos da minha vida.

Dedico e ofereço

Agradecimentos

À minha família, meus pais Ildemar Holz e Lóia Denice Manske Holz, e meu irmão Natan Henrique Manske Holz, que me proporcionaram o suporte e motivação necessária para seguir os meus sonhos.

Ao meu namorado, Jai Bezerra Massaut Segundo, por se fazer presente e me apoiar incondicionalmente durante todo o período do mestrado. Teu incentivo e ajuda foram essenciais para a realização desse trabalho, principalmente em tempos pandêmicos. Fostes, e és, meu maior incentivador, amigo e companheiro. Obrigada por compartilhar momentos ao meu lado.

A família Massaut, Eleana, Yasmin e Jai Massaut, minha família pelotense, obrigada pelo acolhimento, incentivo e palavras de carinho.

À Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel e a Universidade Federal de Pelotas pelos anos de ensino acadêmico e pela estrutura que me foi concedida.

Ao Programa de Pós-graduação em Fitossanidade (PPGFs) da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” (FAEM), Universidade Federal de Pelotas (UFPeI) e a todos os professores e colegas que colaboraram para o meu crescimento pessoal e profissional.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Ao meu orientador Dr. Leandro José Dallagnol e, ao meu coorientador Dr. Keilor da Rosa Dorneles. Agradeço pela orientação, ensinamentos e confiança.

Aos colegas e estagiários do Laboratório de Interação Planta-Patógeno, obrigada por toda ajuda e amizade.

Ao meu amigo e colega de LIPP, Alfonso Daniel Victoria Arellano, obrigada pelo apoio e ajuda desde 2017. Tua amizade é muito importante para mim, te desejo muito sucesso na tua nova fase de vida.

Aos amigos de longa data Camila Cardoso, Daiane Sperling, Ivana Moisinho, Tais Dalla Nora, Kathleen Huttner, Karina Amaral, Diovan Goulart e Eduardo Borges obrigada por toda amizade e palavras amigas. Sinto saudades diariamente!

A todos que direta ou indiretamente colaboraram no trabalho, muito obrigada!

Resumo

HOLZ, Tailine Manske. **Alterações fisiológicas e bioquímicas em plantas de cevada supridas com silício e tratadas com fungicida contra *Bipolaris sorokiniana***. Orientador: Leandro José Dallagnol. 2021. 101f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Fitossanidade. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

A mancha marrom em cevada, causada pelo fungo *Bipolaris sorokiniana* (Sacc. In Sorok), é umas das principais doenças que ocorre na cultura, reduzindo a produtividade e a qualidade do grão para indústria cervejeira. O manejo da doença envolve a redução de inóculo inicial, uso de cultivares com resistência parcial, complementado com aplicações de fungicidas, as quais atenuam a taxa de progresso da doença. Assim, outras medidas podem ser úteis para complementar e ou aumentar a eficiência de manejo. Com base nisso, objetivou-se neste estudo investigar os efeitos da suplementação de Si no solo para plantas de cevada das cultivares AnaG01 e BRS Cauê, aliado com a aplicação preventiva do fungicida fluxapiroxade + piraclostrobina + epoxiconazol aos 7 ou 15 dias antes da inoculação com *B. sorokiniana*, na redução da intensidade da mancha marrom, nos mecanismos bioquímicos de defesa (Artigo 1), e nas respostas fisiológicas decorrentes do processo de infecção por *B. sorokiniana* nas folhas de plantas (Artigo 2). O suprimento com Si, para ambas as cultivares, reduziu a severidade da doença em 41%, a taxa de expansão da lesão (21 – 36%) e da área abaixo da curva de progresso da doença (15 – 34%). A enzima superóxido dismutase teve maior atividade em plantas inoculadas e supridas com Si. Plantas supridas com Si também apresentaram maior concentração de compostos fenólicos e de derivados do ácido lignina-tioglicólico, e redução do extravazamento de eletrólitos. Em relação as respostas fotossintéticas, nas plantas inoculadas ocorreu redução da assimilação líquida de CO₂ (*A*) e aos 10 dias após a inoculação (*dai*) ocorreu decréscimo da condutância estomática (*g_s*), da concentração interna de CO₂ (*C_i*) e da taxa transpiratória (*E*). As concentrações de clorofila total, clorofila *a* e carotenoides aumentaram, enquanto a de clorofila *b* foi reduzida nas folhas inoculadas. O suprimento de Si amenizou os danos nas trocas gasosas (*A* e *g_s*) e na concentração de pigmentos. A associação de Si e fungicida conferiu maior redução na intensidade da doença e a manutenção de melhor estado fisiológico da planta quando desafiada com *B. sorokiniana*. Os resultados deste estudo demonstraram o potencial do Si em incrementar a resistência de plantas de cevada à mancha marrom por meio da potencialização de respostas bioquímicas de defesa ou pela redução do dano fisiológico causado pela infecção pelo patógeno.

Palavras-chave: Mancha marrom, adubação silicatada, fungicida preventivo, mecanismos de defesa, pigmentos fotossintéticos, fotossíntese.

Abstract

HOLZ, Tailine Manske. **Physiological and biochemical changes in barley plants supplied with silicon and treated with fungicide against *Bipolaris sorokiniana***. Advisor: Leandro José Dallagnol. 2021. 101p. Dissertation (Master degree) - Crop Protection Graduate Program. Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

Spot blotch on barley, caused by the fungus *Bipolaris sorokiniana* (Sacc. In Sorok) is one of the main diseases that occur in the crop, reducing yield and grain quality for the brewing industry. The disease management include strategies such as the reduction of initial inoculum, use of cultivars with partial resistance, complemented with fungicide applications, which aim to attenuate the rate of disease progress. Thus, other management measures can be useful to complement and/or increase the control efficiency. Searching for additional management measures, the objective of this study was to investigate the effects of silicon (Si) amendment in the soil to barley plants of the cultivars AnaG01 and BRS Cauê, combined with the preventive application of the fungicide fluxapirroxade + pyraclostrobin + epoxiconazol at 7 or 15 days before inoculation with *B. sorokiniana*, in the reduction of the spot blotch intensity and on the biochemical defense mechanisms (Article 1), and on the physiological alteration resulting of the process of infection by *B. sorokiniana* in the leaves (Article 2). The results showed a reduction in disease severity, for both cultivars supplied with Si, up to 41%, as well as reduction in the rate of lesion expansion (21 – 36%) and in the area under the disease progress curve (15 – 34%). The superoxide dismutase enzyme had the greatest activity in inoculated plants and supplied with Si. Plants supplied with Si also showed a higher concentration of phenolic compounds and lignin-thioglycolic acid derivatives, and reduced electrolyte leakage. Regarding photosynthetic responses, in inoculated plants, there was a reduction in net assimilation of CO₂ (*A*), and 10 days after inoculation there was a decrease in stomatal conductance (*g_s*), internal CO₂ concentration (*C_i*), and transpiration rate (*E*). The concentrations of total chlorophyll, chlorophyll *a* and carotenoids increased, while chlorophyll *b* has been reduced in the leaves of inoculated plants. The supply of Si ameliorated the damage on the gas exchange variables (*A* and *g_s*) and on the concentration of pigments. The association of Si and fungicide provided a greater reduction of disease intensity and maintenance of a better physiological state of the plant when challenged with *B. sorokiniana*. The results of this study demonstrated the potential of Si to increase the resistance of barley plants to spot blotch, through the potentiation of biochemical defense responses or the reduction of physiological damage caused by the pathogen infection.

Keywords: Spot blotch, silicate fertilization, preventive fungicide, defense mechanisms, photosynthetic pigments, photosynthesis.

Sumário

1. Introdução Geral.....	11
2. Artigo 1 - Silício potencializa a resposta de defesa bioquímica de cevada contra <i>Bipolaris sorokiniana</i>	15
1. Introdução.....	18
2. Material e métodos.....	21
2.1. Material vegetal e cultivo	21
2.2. Características do solo, fertilização e aplicação dos corretivos de solo	21
2.3 Delineamento experimental.....	22
2.4. Aplicação do fungicida	22
2.5. Inoculação das plantas de cevada.....	23
2.6. Avaliação da doença	24
2.7. Determinação da atividade enzimática, quantificação da concentração de compostos fenólicos solúveis totais (CFST), derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG) e extravasamento de eletrólitos (EE).	24
2.7.1. Coleta do material para análises bioquímicas	24
2.7.2. Atividade enzimática	25
2.7.3. Quantificação de CFST, DLATG e EE	26
2.8. Concentração foliar de Si	28
2.9 Análises dos dados.....	28
3. Resultados.....	29
3.1. Componentes de resistência.....	29
3.2. Atividade enzimática.....	29
3.3 Compostos fenólicos solúveis totais (CFST), derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG) e extravasamento de eletrólitos (EE)	35
3.4 Concentração foliar de Si.....	39
4. Discussão	40
Referências.....	45
3. Artigo 2 – Efeito da fertilização silicatada e aplicação de fungicida nas respostas fotossintéticas em folhas de cevada desafiadas por <i>Bipolaris sorokiniana</i>	61
1. Introdução.....	64
2. Material e métodos.....	67

2.1. Material vegetal e cultivo	67
2.2. Características do solo, fertilização e aplicação dos corretivos de solo	67
2.3 Delineamento experimental.....	68
2.4. Aplicação do fungicida	68
2.5. Obtenção do inoculo e inoculação das plantas de cevada	69
2.6. Avaliação da doença	71
2.7. Determinação das trocas gasosas	71
2.8. Determinação da concentração dos pigmentos fotossintéticos	72
2.9. Concentração foliar de Si	72
2.10. Análise dos dados	72
3. Resultados.....	73
3.1. Componentes de resistência.....	73
3.2. Trocas gasosas	73
3.3. Pigmentos fotossintéticos	76
3.4. Concentração de Si na folha	79
4. Discussão	80
4. Considerações Finais	98

1. Introdução Geral

A cevada (*Hordeum vulgare* L.) está entre os cereais de maior relevância mundial, em termos de produção e área cultivada, ocupando a quarta posição entre os mais cultivados economicamente, perdendo apenas para o arroz, milho, e o trigo (CARPENTIERI-PIPOLO & MINELLA, 2021; AGOSTINETTO et al., 2020). Em 2020, a área cultivada foi de cerca de 70 milhões de hectares mundialmente, com produção de 160 milhões de toneladas (FAO, 2020).

A cevada é destinada principalmente para alimentação humana e animal. Na alimentação humana, os grãos são reservados à fabricação de farinhas, *in natura* ou malteada; e na alimentação animal pode ser fornecida através de silagem, feno, pastagem, grãos e, principalmente, rações, desta equivalendo a 65,8% da produção mundial (MORI e MINELLA, 2012).

No Brasil, o cultivo concentra-se na Região Sul, principalmente pelo clima favorável à produção do cereal com qualidade. Os estados do Rio Grande do Sul e Paraná respondem por praticamente 98% da produção nacional, o que correspondeu na safra de 2019 a 429,4 mil toneladas do cereal. Em 2020 houve decréscimo no seu volume total, devido a fatores climáticos desfavoráveis, como o déficit hídrico e a ocorrência de geadas tardias, comprometendo a produção final, a qual foi de 374,4 mil toneladas (CONAB, 2020), já para 2021, está previsto a produção de 424,1 mil toneladas (MAPA, 2021).

A necessidade pelo cereal vem se expandindo, devido a maior demanda de malte. A demanda nacional é de aproximadamente 1,6 milhões de toneladas de malte, mas a produção nacional atual supre apenas cerca de 26% da necessidade da indústria nacional (MAPA, 2021). No Brasil, a extensiva utilização da cevada para fabricação do malte se deve por ser a principal matéria prima na fabricação da cerveja. O Brasil é considerado o terceiro maior produtor mundial, totalizando, aproximadamente, 14 bilhões de litros por ano, o que representa 2% do produto interno bruto (PIB) do país, movimentando R\$100 bilhões anualmente e empregando 2,7 milhões de pessoas (MAPA, 2019).

Visando a expansão da área cultivada e o aumento na produção nacional, as indústrias cervejeiras têm fomentado os produtores, através da compra antecipada da safra antes mesmo da semeadura (MINELLA, 2015). No entanto, a cevada produzida pelos produtores necessita atender o padrão de qualidade conforme

estabelecido na Portaria 691/96 do Ministério da Agricultura e Abastecimento. A cevada para ser comercializada para malte deve apresentar teor de umidade de no máximo 13%, poder germinativo de no mínimo 95%, teor de proteínas deve ser de até 12%, os grãos avariados devem ser de no máximo até 5%, e matérias estranhas e impurezas não devem ultrapassar 3% (BRASIL, 2011).

Assim, estresses que ocorrerem durante o cultivo da cevada podem comprometer a quantidade e qualidade do grão, com destaque para as doenças (REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 2017). Dentre as doenças que atacam a cultura, a mancha marrom, causada por *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoemaker, destaca-se entre os principais manchas foliares (TURQUETI et al., 2001), causando danos na produtividade de até 70% (NAVAKAZI et. al., 2020; AGOSTINETTO et al. 2015). As injúrias decorrentes do patógeno são devido a redução do processo fotossintético e a elevação da taxa de respiração e transpiração, ocasionando a diminuição no número de filhotes e espigas por planta, além de atacar as espigas, ocasionando a descoloração e escurecimento na ponta dos grãos, diminuindo a qualidade do malte e da cerveja (REIS & CASA, 2001).

A introdução do patógeno nos locais de cultivo podem ocorrer por meio da disseminação dos conídios pelo vento de áreas contaminadas para áreas indenizadas e, também, por sementes infectadas (FERRARI & POSSAMAI, 2015). A sobrevivência do patógeno dá-se em hospedeiros alternativos, como *Paspalum notatum* var. pensacola, *Echinochloa crusgali*, *Digitaria sanguinalis* e *Brachiaria plantaginea*, bem como em outros cereais de inverno cultivados, assim como em restos de cultura na entressafra (REIS & CASA, 2001). Desta forma, o aumento da severidade da mancha marrom nos cultivos são decorrentes, principalmente, pelo sistema de plantio direto, uso de sementes contaminadas e o monocultivo (FERRARI & POSSAMAI, 2015; REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 2017).

Mediante a isso, aliado a inexistência de cultivares resistentes, o manejo da doença é realizado com a adoção de medidas que visam diminuir e/ou evitar prejuízos no rendimento e na qualidade cervejeira (AGOSTINETTO et al., 2020), tal como reduzir o inóculo inicial e o progresso das epidemias por meio do uso de fungicidas. Para o controle da doença, a aplicação de fungicidas tem sido uma medida muito utilizada pelos agricultores para atenuar os danos ocasionados. No entanto, dependendo do nível de suscetibilidade da cultivar, do sistema de cultivo e das condições climáticas durante o cultivo, podem ser requeridas até quatro

pulverizações com fungicidas. Assim, para reduzir o número de pulverizações ou aumentar a eficácia de manejo, uma estratégia é o uso de medidas que visam aumentar a resistência das plantas de cevada ao patógeno.

Neste contexto, a utilização do silício (Si) torna-se uma alternativa atrativa, devido a seus efeitos benéficos no crescimento, aproveitamento de nutrientes e potencialização da resistência das plantas a patógenos e pragas (DEBONA et al., 2017). Estudos comprovam que o fornecimento de Si, em várias espécies de plantas, tem conferido redução da intensidade de doenças importantes (RODRIGUES et al., 2015). Em cevada, o uso do Si reduziu a severidade do oídio (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) (WIESE et al., 2005; WANG et al., 2017) e da giberela (*Fusarium* spp) (SAKR, 2021).

Os estudos demonstram que o efeito do Si na redução da intensidade das doenças é devido a mecanismos que atuam de forma aditiva e/ou sinérgica (RODRIGUES & DATNOFF, 2015). Um dos mecanismos atua como barreira física, a qual é constituída pelo espessamento e lignificação da parede celular das células epidérmicas, evitando a penetração mecânica do patógeno. Este evento ocorre devido à movimentação ascendente do elemento, desde as raízes até as folhas, onde o Si se polimeriza nas lacunas extracelulares, acumulando-se nas paredes das células epidérmicas das folhas, logo abaixo da cutícula, e em células especializadas para deposição de Si (MA e YAMAJI, 2008; SHETTY et al., 2012). Logo, a deposição de Si juntamente às células da epiderme, estômatos e tricomas promovem maior rigidez cuticular contra a penetração do patógeno (KAUSS et al., 2003; CRUZ et al., 2014). Adicionalmente, a deposição de Si na parede celular pode prejudicar o fluxo de efetores ou toxinas liberadas por patógenos bem como uma menor difusão de nutrientes conferindo uma evolução mais lenta da doença (COSKUN et al., 2019).

Outro mecanismo funciona como barreira bioquímica, na qual o Si atua potencializando a síntese e deposição de compostos fenólicos e fitoalexinas, o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ERO's), a alteração na atividade de enzimas oxidoredutases e glicolases envolvidas no sistema de defesa da planta (RODRIGUES e DATNOFF, 2015; DEBONA et al., 2017; WANG et al., 2017). Todavia, não se descarta a possibilidade do Si atuar na potencialização das defesas da planta por meio de seu efeito na homeostase de fitohormônios e na interação com os componentes de sinalização, como fósforo (P) ou metais catiônicos, tais

103 como manganês (Mn) e ferro (Fe), que atuam como cofatores para várias enzimas
104 (BOCKHAVEN et al., 2013).

105 Considerando os resultados positivos obtidos pela aplicação de Si no manejo
106 de doenças da cevada supramencionados e diante da limitada disponibilidade de
107 medidas eficazes para a redução da intensidade da mancha marrom na cevada,
108 acredita-se que adubação silicatada, aliada com a aplicação antecipada de
109 fungicida, são estratégias a serem incorporadas no manejo integrado dessa doença,
110 potencializando as respostas fisiológicas e a produção de compostos de defesa da
111 planta em resposta a infecção por *B. sorokiniana*.

112 Partindo desse pressuposto, objetivou-se neste estudo avaliar os efeitos da
113 adubação silicatada, como fonte de Si solúvel, e aplicação antecipada do fungicida
114 nas respostas bioquímicas, como a determinação de enzimas antioxidantes,
115 quantificação da concentração de compostos fenólicos solúveis totais, derivados
116 lignina-ácido tioglicólico e de extravasamento de eletrólitos; e fisiológicas, por meio
117 da avaliação de trocas gasosas, concentração de pigmentos fotossintéticos de
118 plantas de cevada desafiadas com o fungo *B. sorokiniana*.

119 **2. Artigo 1 - Silício potencializa a resposta de defesa bioquímica de cevada**
120 **contra *Bipolaris sorokiniana***

121 *Artigo redigido nas normas da revista "*Physiological and Molecular Plant Pathology*"
122 (versão em português).

**Silício potencializa a resposta de defesa bioquímica de cevada
contra *Bipolaris sorokiniana***

Tailine M, Holz^a, Keilor R, Dorneles^a, Anderson E, Brunetto^a, Alfonso D, Victoria Arellano^a,
Jai B, M, Massaut Segundo^b, Leandro J, Dallagnol^{a*}

^a Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de
Fitossanidade, 96010-900, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

^b Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de
Fitotecnia, 96010-900, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

*E-mail: leandro.dallagnol@ufpel.edu.br

134 **Resumo**

135 A mancha marrom causada pelo fungo *Bipolaris sorokiniana* é uma das principais doenças da
 136 cevada e pode causar dano expressivo na produtividade. Em cultivos comerciais, a aplicação
 137 de fungicidas têm sido uma das principais ferramentas no manejo da doença. No entanto,
 138 inúmeros estudos evidenciam que a utilização do silício (Si) potencializa o sistema de defesa
 139 do hospedeiro. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito do Si, aliado com a
 140 aplicação antecipada do fungicida, nas defesas da cevada à mancha marrom, através da
 141 avaliação dos componentes de resistência, da atividade de enzimas do sistema antioxidante
 142 (ascorbato peroxidase – APX, catalase – CAT, peroxidase – POX, e superóxido dismutase -
 143 SOD), do acúmulo de compostos do metabolismo secundário (compostos fenólicos solúveis
 144 totais – CFST, e derivados de lignina ácido tioglicólico - DLATG), e o dano celular através da
 145 determinação dos extravasamentos de eletrólitos (EE) durante o processo de infecção de *B.*
 146 *sorokiniana*. As cultivares AnaG01 e BRS Cauê, ambas suscetíveis, foram cultivadas em solo
 147 suprido com silicato de cálcio (+Si) ou calcário extrafino (-Si) e tratadas com o fungicida
 148 fluxapiraxade + piraclostrobina + epoxiconazol aos 7 ou 15 dias antes da inoculação (DAI).
 149 As enzimas do sistema antioxidantes, CFST, DLATG e EE foram determinadas antes da
 150 inoculação (plantas saudáveis) e das 24 até 120 horas após a inoculação (hai). A inoculação com
 151 *B. sorokiniana* aumentou as atividades de APX, CAT, POX e SOD, incrementou o acúmulo
 152 de CFST, DLATG e contribuiu para maior EE em folhas. Na AnaG01 ocorreu incremento da
 153 SOD, POX, CFST e DLATG, enquanto a BRS Cauê ocorreu maior atividade na CAT, e EE e
 154 na concentração foliar de Si. A aplicação de fungicida aos 15 DAI promoveu incremento da
 155 atividade de SOD e POX, enquanto na ausência de fungicida aumentou a atividade de CAT,
 156 APX, CFST e DLATG. O EE foi maior nas plantas da BRS Cauê e -Si, e não diferiu aos 7 e
 157 15 DAI. Nas plantas com Si houve a redução dos componentes de resistência em 34, 36 e
 158 41% na AACPD, *r* e severidade final quando comparado as plantas sem Si, sendo o
 159 incremento maior na BRS Cauê. A atuação conjunta de Si e fungicida resultou em menor
 160 intensidade da doença e incrementou as defesas bioquímicas da cevada quando desafiada com
 161 *B. sorokiniana*.

163 Palavras-chave: enzimas antioxidantes, dano celular, mancha marrom, silicato de cálcio,
 164 resistência

1. Introdução

A mancha marrom, causada por *Bipolaris sorokiniana* (Sacc. in Sorok) Shoemaker, é uma das principais doenças foliares que acometem os cereais de inverno no Sul do Brasil. Para a cevada (*Hordeum vulgare*), o fungo compromete a produtividade e a qualidade dos grãos (Mathre, 1982; Reis e Casa, 2001; Antoniazzi e Deschamps, 2007). O dano na produtividade de grãos pode ser de até 70% (Navakazi et. al., 2020; Agostinetto et al. 2015), sendo mais expressivo quando ocorre infecção severa na folha bandeira (Gangwar et. al., 2018).

O fungo *B. sorokiniana* apresenta parasitismo tipo hemibiotrófico. Na primeira fase (biotrófica), as hifas do fungo penetram a cutícula e a parede celular da epiderme de uma única célula e, através da formação de vesícula, estabelece a relação parasitária estável com o hospedeiro, sem causar a morte celular (Kumar et. al., 2002). Na segunda fase, o patógeno adquire um comportamento necrotrófico, secretando toxinas (sesquiterpenos), que induzem os sintomas típicos da doença e a morte celular; e enzimas hidrolíticas, como celulase, hemicelulase, pectinase, amilase, e protease, a fim de degradar os constituintes celulares (Kumar et. al., 2002; Kumar et. al., 2015; Gangwar et. al., 2018). Dentre os metabolitos fitotóxicos produzidos por *B. sorokiniana* estão o pré-helminthosporol (composto predominantemente produzido e mais ativo; causando inibição de enzimas de defesa do hospedeiro), helminthosporol (compromete a permeabilidade de membranas), sorociniana (inibi a germinação de grãos/sementes) e, recentemente, foi descoberto um efetor, denominado de ToxA, com ação necrotrófica específica ao hospedeiro, que leva ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs) no cloroplasto (Akesson et al., 1996; Nakajima et al. 1998; Kumar et. al., 2002; McDonald et al., 2018; Novakazi et. al., 2020; Olbe et al., 1995).

No controle da mancha marrom da cevada, uma medida de manejo amplamente utilizada é a aplicação de fungicida (Agostinetto et. al., 2015). Por exemplo, o fungicida

fluxapiraxade + piraclostrobina + epoxiconazol aplicado de forma preventiva, reduziu significativamente a incidência, severidade, número e tamanho das lesões (Dominguez et al., 2021). Entretanto, a aplicação de fungicida frequente, ou de forma tardia, podem resultar em acréscimo no custo de produção, sem que haja acréscimo de produtividade e elevando a probabilidade da ocorrência de resistência no patógeno às moléculas dos produtos químicos (Agostinetto et al., 2015; Kaur et al., 2021), sendo necessário aliar outras medidas ao manejo para reduzir a intensidade da mancha marrom em cevada.

Dentre as estratégias de controle de doenças, o uso do silício (Si) demonstra grande potencial para reduzir os danos causados por patógenos fúngicos, e tem sido amplamente estudado e integrado no manejo das culturas de importância econômica (Rodrigues et al., 2015a; Debona et al., 2017; Cruz et al., 2020; Pazdiora et al., 2021). Em cereais de inverno, como trigo por exemplo, estudos mostraram que plantas supridas com Si apresentaram menor severidade de doenças como a mancha marrom (*Bipolaris sorokiniana*), brusone (*Magnaporthe oryzae* patotype *Triticum*), septoriose (*Zymoseptoria tritici*), oídio (*Blumeria graminis* f. sp. *tritici*), mancha amarela (*Pyrenophora tritici repentis*), e giberela (*Fusarium* spp.) (Dallagnol et al. 2020; Pazdiora et al. 2021). Já para cevada, o Si promoveu a redução da intensidade da doença oídio (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) e giberela (*Fusarium* spp) (Wiese et al., 2005; Wang et al., 2017; Sakr, 2021).

O papel do Si na redução da intensidade de doenças está associado à maior dificuldade de penetração e colonização dos tecidos devido a formação de uma barreira física originada pela dupla camada Si-cutícula, e da sua deposição junto a papilas e paredes celulares, agindo negativamente a pressão mecânica exercida pelo patógeno (Kumar et al., 2002; Kim et al., 2002). Além da barreira física conferida pelo Si polimerizado, a presença do Si solúvel é associado com a potencialização do sistema de defesa do hospedeiro, por meio do acúmulo de compostos de defesa pela via rota dos fenilpropanoides, resultando em acréscimo

nas concentrações de compostos fenólicos, lignina, e fitoalexinas, alterando a atividade enzimas relacionadas à defesa (defesa direta contra o patógeno e do sistema antioxidante), bem como, possivelmente pela obstrução apoplástica da movimentação de fatores de patogenicidade/virulência do patógeno (Rodrigues et al., 2015a; Debona et al., 2017; Dorneles et. al., 2017; 2018; Wang et al., 2017; Coskun et al., 2019; Cruz et al., 2020). Em relação as enzimas do sistema antioxidante, plantas supridas com Si têm apresentado maior atividade de algumas enzimas, tais como ascorbato peroxidase (APX), a catalase (CAT), a peroxidase (POX) e a superperóxido dismutase (SOD), as quais podem detoxificar a célula de compostos danosos, como as EROs, bem como levar a formação de substâncias antimicrobianas, resultando em uma atenuação da doença nas plantas (Wang et al., 2017). A potencialização do sistema antioxidante pode ser um importante mecanismo para conter o avanço da mancha marrom no tecido da planta, especialmente durante a fase necrotrófica, condição que possivelmente pode ser obtida pelo fornecimento de Si às plantas de cevada. Acredita-se que o progresso mais lento da doença nas plantas supridas com Si pode favorecer o controle do fungicida, aumentando sua eficiência de controle e /ou prolongando o período de maior eficiência.

Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da associação da fertilização silicatada no solo, como fonte de Si solúvel, com a aplicação foliar de fungicida nos mecanismos bioquímicos de defesa da cevada contra *B. sorokiniana*. Para tal, a atividade de enzimas oxidorredutases (APX, CAT, POX e SOD), a concentração dos compostos fenólicos solúveis totais, a concentração de derivados do ácido lignina-tioglicólico e o extravazamento de eletrólitos, foram quantificados em plantas suscetíveis de cevada à mancha marrom, supridas ou não com fertilização silicatada, e sem ou com aplicação antecipada de fungicida aos 7 e 15 dias antes da inoculação.

2. Material e métodos

2.1. Material vegetal e cultivo

As cultivares de cevada AnaG01 (Fapra-Agrária®) e BRS Cauê (Embrapa ®), ambas suscetíveis a mancha marrom, foram utilizadas nos experimentos. Estas cultivares foram selecionadas devido a semelhança na duração ciclo, período de florescimento e uso no mercado. As sementes foram semeadas em vasos plásticos (capacidade de 8 L) contendo 6 kg de solo. Em cada vaso foi cultivado 6 plantas. Durante todo o experimento, as plantas foram mantidas em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Fitossanidade, da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” da Universidade Federal de Pelotas (RS). As temperaturas médias diárias variaram entre 2 e 26°C, e a umidade relativa entre 60 e 98%.

2.2. Características do solo, fertilização e aplicação dos corretivos de solo

As características físico-químicas do solo utilizado no estudo foram as seguintes: 54 g kg⁻¹ silte; 251 g kg⁻¹ argila; classe textural médio argiloso; pH em água 5.8; 12 mg dm⁻³ P; 6 mg dm⁻³ S; 5,8 mg dm⁻³ K; 3,1 cmolc dm⁻³ Ca; 1,7 cmolc dm⁻³ Mg, 0,6 cmolc dm⁻³ Al; 4,4 cmolc dm⁻³ H + Al; 53% saturação por bases; 1,99% matéria orgânica; Índice SMP 6. O solo utilizado foi peneirado e a correção da fertilidade química realizada conforme as indicações para a cultura da cevada (Minella, 2019). A dose de nitrogênio foi de 0,24 mg kg⁻¹, na forma de uréia, onde 0,08 mg kg⁻¹ foi aplicado na semeadura, 0,08 mg kg⁻¹ no início do afilhamento e o restante no início do alongamento; a dose de fósforo (P) foi 0,07 mg kg⁻¹ de P₂O₅ e a dose de potássio (K) foi de 0,03 mg kg⁻¹ de K₂O. P e K foram aplicados na semeadura.

A fonte de Si foi o silicato de cálcio (Agrosilício Plus®, Agronelli Insumos Agrícolas, Uberaba, Brasil), composto por 10,5% de Si, 25% de Ca e 6% de Mg. A dose de silicato de cálcio aplicada foi equivalente a 13,2 toneladas ha⁻¹ para elevar o pH do solo até 6.5. Para isolar o efeito do Si, nos tratamentos controle foi adicionado calcário extrafino (Dagoberto Barcelos, Caçapava do Sul, Brasil), composto por 25% de Ca e 15% de Mg. A dose de

calcário foi de 11,0 toneladas ha^{-1} . As concentrações adicionadas de Ca e Mg entre os tratamentos foram ajustadas utilizando, separadamente, carbonatos de Ca e Mg. Os corretivos foram misturados ao solo de cada tratamento e incubados por 30 dias em sacos plásticos com a umidade próxima de 80% da capacidade de retenção de água do solo para que ocorresse a solubilização dos elementos minerais. A concentração de Si disponível (extração em CaCl_2 0.01 M) no solo no momento da semeadura foi de 23,7 mg kg^{-1} para solo com silicato de cálcio e 11,4 mg kg^{-1} para solo com calcário extrafino.

2.3 Delineamento experimental

O experimento foi disposto em delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. Os fatores estudados consistiram de cultivares (AnaG01 e BRS Cauê), corretivos no solo (silicato de cálcio e calcário extrafino), aplicação fungicida (7 ou 15 dias antes da inoculação, e sem aplicação) e o tempo de amostragem (-1 (antes da inoculação), 24, 48, 72, 96 e 120 horas após a inoculação). O experimento foi realizado duas vezes.

2.4. Aplicação do fungicida

A aplicação do fungicida foi realizada após quarenta e um (41) dias da semeadura, durante o estágio de crescimento 31 (segundo a escala de Zadoks, 1974). O fungicida epoxiconazol (50 g. L^{-1}) + fluxapiroxade (50 g. L^{-1}) + piraclostrobina (81 g. L^{-1}) (BASF®), selecionado entre os indicados para o controle da doença no Brasil (Reunião nacional de pesquisa de cevada, 2017), na dose de 1,0 L ha^{-1} foi aplicado de forma preventiva, aos quinze (15) ou sete (7) dias antes da inoculação da planta. As aplicações foram efetuadas pelo horário da manhã, com temperatura de entre 17-22°C, UR entre 60-70%, e velocidade do vento de 2-5 km h^{-1} . A aplicação foi realizada com um pulverizador costal pressurizado por CO_2 , equipado com barra de 3 bicos, com pontas de jato plano em leque, série 110.02, espaçadas em 50 cm e calibradas para um volume de calda de 150 L ha^{-1} .

2.5. Obtenção do isolado e teste de patogenicidade

O isolado fúngico utilizado neste estudo foi obtido de sementes da cultivar BRS Cauê foram coletadas no Centro Agropecuário da Palma, da Universidade Federal de Pelotas, no município de Capão do Leão, RS. Após obter isolado monospórico do fungo, o mesmo foi cultivado em meio batata-dextrose-agar (BDA). A patogenicidade do isolado foi confirmada por meio da inoculação da suspensão de esporos, 1×10^4 conídios por mL, em plantas de cevada da cultivar BRS Cauê com 60 dias de idade. A identidade do isolado fúngico foi confirmada como *Bipolaris sorokinina* por meio da extração de DNA, para amplificação e sequenciamento das regiões da gliceraldeído 3-fosfato desidrogenase (GAPDH) e 5,8S nrDNA com as regiões espaçadoras transcritas internas (ITS) e 28S DNA ribossômico (LSU). As amplificações de PCR, purificação de produtos de PCR, sequenciamento e edição de sequências forward e reverse foi feita conforme ao descrito por Victoria Arellano et al., 2021. As sequências obtidas foram depositadas no GenBank sob os números de acessos OK631542 para GAPDH, e OK623477 para ITS.

2.7. Preparo do inóculo e inoculação das plantas de cevada

O isolado do fungo foi repicado para placa de Petri contendo meio BDA, e mantido em BOD por sete dias a temperatura $25^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ e fotoperíodo de 12h. No sétimo dia, os conídios foram coletados, com o auxílio da alça de Drigalski, em água destilada contendo 0,01% de Tween 20%, e a concentração ajustada para 1×10^4 conídios mL^{-1} (Barba et al., 2004).

A inoculação das plantas de cevada foi por meio da pulverização foliar da suspensão de esporos de *B. sorokiniana*, aos 56 dias após a emergência das plântulas (estádio 42 de crescimento conforme escala fenológica de Zadoks et al. 1974) por meio da utilização de um borrifador manual (TECBLAS® 45 mL). Toda a superfície foliar de todas as plantas foram completamente cobertas pela pulverização, contudo sem provocar escorrimento superficial.

Imediatamente após a inoculação, as plantas foram transferidas para uma câmara de nevoeiro com temperatura de 25 ± 3 °C, onde permaneceram por 48h.

O isolado fúngico de *B. sorokiniana* (LIPP BITA01) utilizado nos estudos foi armazenado na Coleção de Fungos do Laboratório de Fungos Fitopatogênicos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. A preservação do fungo foi em água destilada esterilizada e mantido em temperatura de 10°C (Castelani, 1939).

2.8. Avaliação da doença

As variáveis avaliadas foram a taxa de expansão de lesão (r), a severidade final (SF) e a área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD). A taxa r foi estimada com base nas mensurações de cinco lesões em uma folha de cada planta. As mensurações foram realizadas a cada 24 h após o aparecimento dos primeiros sintomas, totalizando dez avaliações no tempo. A severidade da mancha marrom foi estimada com base na proporção da área da folha atacada pela doença em relação a área total da folha de acordo com a escala diagramática descrita por Azevedo (1997), totalizando dez avaliações. Os dados de severidade da doença em função do tempo foram utilizados para calcular a área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) conforme fórmula proposta por Shaner & Finney (1977). A SF é o valor da severidade da última avaliação realizada aos 13 dias após a inoculação.

2.9. Determinação da atividade enzimática, quantificação da concentração de compostos fenólicos solúveis totais (CFST), derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG) e extravasamento de eletrólitos (EE).

2.9.1. Coleta do material para análises bioquímicas

Folhas completamente expandidas foram coletadas às -1 (antes da inoculação), 24, 48, 72, 96 e 120 horas após inoculação (hai) para determinação da atividade enzimática e às -1 (antes da inoculação), 24, 72 e 120 HAI para determinação de CFST, DLATG e EE. Para cada tempo de coleta foram utilizadas quatro repetições, cada uma constituída por 3 folhas

expandidas de uma planta de cada vaso do tratamento. Imediatamente após a coleta, as amostras foram congeladas em N₂ e armazenadas em ultra freezer (-80°C) até a realização das análises.

2.9.2. Atividade enzimática

Os extratos vegetais para a quantificação das atividades enzimáticas foram obtidos conforme a metodologia descrita em Dallagnol et al. (2011) com algumas modificações. Para tal, amostras de tecido foliar de 0,5g foram maceradas em N₂ para obtenção do extrato foliar. Imediatamente após maceração foi adicionada a solução de extração, constituída de tampão fosfato de potássio (100 mM, pH 6,8), contendo fluoreto de fenilmetilsulfonil (1 mM) e polivinilpolipirrolidona (40 mg). Em seguida esse material foi centrifugado a 12.000 x g por 15 min a 4°C. O sobrenadante foi utilizado para determinação das atividades enzimáticas.

A atividade da enzima superóxido dismutase (SOD, EC 1.15.1.1) foi determinada conforme metodologia de Ribeiro et al. (2014), por meio da capacidade da enzima em inibir a fotorredução do azul de nitrotetrazólio (NBT), em um meio de reação contendo 1.000 µL fosfato de potássio 100 mM (pH 7,8), 400 µL metionina 70 mM, EDTA 10 µM, NBT 1 mM, riboflavina 0,2 µM, 390 µL água destilada e 20 µL de extrato vegetal. A absorbância foi determinada a 560 nm. Uma unidade da SOD correspondeu à quantidade da enzima capaz de inibir em 50% a fotorredução do NBT, nas condições do ensaio, sendo os resultados expressos em unidades de SOD mg⁻¹ de proteína (Giannopolitis; Ries, 1977).

A atividade da enzima catalase (CAT, EC 1.11.1.6) foi definida através quantificação da degradação do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) (Azevedo et al., 1997). O meio de reação foi composto por 1.500 µL do tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 7,5) contendo H₂O₂ 30% (2,5 µL mL⁻¹ do tampão de reação) e 25 µL do extrato vegetal. A absorbância foi determinada a 240 nm e os resultados expressos em µmol de H₂O₂ degradado min⁻¹ mg⁻¹ de proteína.

A atividade da peroxidase (POX, EC 1.11.1.7) foi determinada conforme descrito por Dallagnol et al. (2011). O meio de reação foi composto por 475 μL de água destilada, 375 μL tampão fosfato de potássio 100 mM (pH 6,8), 300 μL pirogalol 100mM, 300 μL H_2O_2 100mM e 15 μL do extrato vegetal. Para o cálculo da atividade da POX foi utilizado o coeficiente de extinção de $0,00247 \text{ M}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (Chance; Maehley, 1955).

A atividade da enzima ascorbato peroxidase (APX EC 1.11.1.11) foi determinada pelo método de Nakano e Asada (1981). Ao meio de reação, composto por 1950 μL de tampão fosfato de potássio 50 mM (pH 6,8), 1 mM de H_2O_2 e 0,8 mM de ascorbato, foi adicionado 45 μL do extrato enzimático bruto, dando início a reação. A atividade de APX foi medida com base na quantificação da taxa de oxidação do ascorbato (Sigma-Aldrich, São Paulo, Brasil) a 290 nm por 1 min a 25°C , e expressa em μmol de ascorbato oxidado $\text{min}^{-1} \text{ mg}^{-1}$ de proteína.

A concentração de proteínas utilizada para o cálculo da atividade das enzimas foi obtida pelo método de Bradford (1976), usando albumina sérica bovina como padrão.

2.9.3. Quantificação de CFST, DLATG e EE

Para a determinação de CFST, 0,1g de tecido foliar foi macerado em almofariz e pistilo contendo N_2 . O pó resultante foi transferido para microtubo e homogeneizado com 1500 μL de metanol 80%, seguido de incubação no escuro a 25°C , sob agitação (200 rpm) por 24 horas. Em seguida, o extrato metanólico foi centrifugado a $12.000 \times g$ por 4 minutos, e o sobrenadante foi transferido para um novo microtubo para a determinação da concentração de CFST. O resíduo sólido insolúvel foi armazenado em ultra freezer (-80°C), para determinação da concentração de DLATG.

A determinação de CFST foi baseada na metodologia desenvolvida por Zieslin e Bem-Zaken (1993) com modificações. A mistura de reação conteve 75 μL do reagente Fenol Folin-Ciocalteu (0,25 N) (Sigma-Aldrich), 75 μL do extrato metanólico, 75 μL de carbonato de sódio (1M) e 1500 μL de água destilada. A absorbância da amostra foi determinada a 725

nm em espectrofotômetro (Bel® modelo UV-UM51), e os resultados foram expressos, em termos de ácido pirogálico, em μg de CFSTs g^{-1} matéria fresca (mf). Para determinação da curva padrão para quantificação dos CFSTs foi utilizado o ácido Pirogálico P.A.-A.C.S. (SYNTH®).

Para determinação da concentração dos DLATG utilizou-se o método de Barber e Ride (1988), onde o resíduo da extração de CFST foi misturado com 1500 μL de água destilada e centrifugado a 12.000 x g por 10 minutos. O sobrenadante foi descartado, e o resíduo deixado na estufa por 24 horas a 65°C. O resíduo alcoólico-insolúvel seco, contendo lignina e ácidos fenólicos foi reidratado com 1500 μL de solução de ácido tioglicólico (Sigma-Aldrich, São Paulo, Brasil) e HCl a 2 N (1:10) e depois colocado em banho-maria a 100°C por 4 horas. Posteriormente, os microtubos foram colocados em gelo (4°C) por 10 minutos. Em seguida, a mistura foi centrifugada a 12.000 x g por 10 minutos, sendo o sobrenadante descartado e o precipitado lavado com 1500 μL de água destilada e centrifugado novamente a 12.000 x g por 10 minutos. Após a centrifugação, o sobrenadante foi descartado e o precipitado ressuspendido em 1500 μL de NaOH a 0,5 N. A mistura permaneceu por 12 horas em mesa agitadora (200 rpm), em temperatura ambiente. Em seguida, os microtubos foram centrifugados a 12.000 x g por 10 minutos e o sobrenadante foi transferido para novo microtubo.

Posteriormente, foram adicionados 200 μL de HCl concentrado ao sobrenadante e os tubos transferidos para geladeira (4 °C) por 4 horas, para precipitação dos derivados da DLATG. Nova centrifugação a 10.000 x g por 10 minutos foi realizada, o sobrenadante descartado e o precipitado (castanho-alaranjado) foi dissolvido em 2000 μL de NaOH a 0,5 N. A absorbância dos derivados da DLATG no sobrenadante foi medida em espectrofotômetro a 280 nm e a concentração expressa em μg de DLATG g^{-1} MF, utilizando uma curva padrão

obtida com diferentes concentrações de lignina alcalina, éter 2- hidroxipropílico de lignina alcalina, éter 2-hidroxipropil (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO).

Para determinação do EE utilizou-se o método descrito por Dorneles et al. (2020), com algumas modificações. Dez discos de folhas (7 mm de diâmetro) foram coletados às -1 (antes da inoculação), 24, 72 e 120 HAI. Os discos, imediatamente após os cortes, foram lavados em água deionizada por duas vezes e, posteriormente, incubados em 3000 µL de água deionizada a 25°C. Decorridos 4h da incubação, foi realizada a primeira leitura da condutividade elétrica (CE1), através de um medidor de condutividade (TECNOPON MCA-150 - Instrumentação científica Tecnopon). Logo após, as amostras foram incubadas a 90°C por 2h, e a condutividade elétrica foi determinada novamente (CE2). O resultado de EE foi determinado como a porcentagem de extravasamento de eletrólitos em relação aos eletrólitos totais conforme a seguinte equação: $EE (\%) = (CE1/CE2) \times 100$.

2.10. Concentração foliar de Si

Ao final do experimento, para assegurar que as variações nas variáveis avaliadas foram devidas a diferenças em concentrações foliares de Si, amostras de folhas completamente expandidas, foram coletadas, lavadas com água destilada e secas em estufa a 70° C, durante 72 horas. Em seguida as folhas foram moídas, em um moinho de facas até o estado de pó fino, e, posteriormente, determinada a concentração foliar de Si em 0,1 g de matéria seca, conforme metodologia descrita por Korndorfer et al. (2004).

2.11 Análises dos dados

Para evidenciar a homogeneidade dos dados foi aplicado o teste de Shapiro Wilk, para todas as variáveis realizadas nos experimentos. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste Tukey ($P \leq 0.05$). As análises foram realizadas através do software SAS (SAS Institute, Inc., 1989, Cary, NC).

3. Resultados

3.1. Componentes de resistência

Os fatores cultivar, corretivo de solo e aplicação de fungicida foram significativos ($P \leq 0.05$) para todos os componentes de resistência (Tabela 1). Na comparação entre cultivares, a AACPD (Tabela S1; Fig. 1a, b), a r (Tabela S1; Fig. 1c, d) e severidade final (Tabela S1; Fig. 1e, f) foram 22,4, 47, e 33% menores na AnaG01 em comparação a BRS Cauê. Nas plantas +Si ocorreram reduções de 34, 36, e 41% na AACPD, r e severidade final, respectivamente (Tabela S1; Fig. 1a-f). Embora significativo para a maioria dos tratamentos, o efeito o Si foi mais intenso na BRS Cauê, especialmente nas plantas SF ou tratadas aos 15 DAI (Fig. 1a-f). A aplicação de fungicida, aos 7 ou 15 DAI, reduziu significativamente AACPD, r , e a severidade final da mancha marrom, independente da cultivar ou do corretivo do solo, com eficiência significativamente maior na aplicação aos 7 DAI (Tabela S1). O tratamento com fungicida aos 7 ou 15 DAI, em comparação as plantas sem fungicida, reduziu a AACPD em 70 e 45%, a r em 31 e 21%, e a severidade final em 74 e 53% (Tabela S1; Fig. 1a-f).

3.2. Atividade enzimática

Os fatores cultivar, corretivo de solo, aplicação de fungicida e horas após inoculação (hai), bem como suas interações, foram significativos ($P \leq 0.05$) para a atividade das enzimas SOD, CAT, POX e APX (Tabela 2 e 3), exceto o fator corretivo de solo para APX (Tabela S2).

Atividade da SOD aumentou nas folhas das plantas a partir das 48 hai (Tabela S2; Fig. 2a-d). De modo geral, a atividade da SOD foi maior nas plantas da AnaG01 em relação a BRS Cauê, das plantas +Si em comparação as -Si e nas plantas SF em comparação as plantas tratadas com fungicida (Tabela S2). Na ausência de fungicida, a maior atividade da SOD foi observada nas plantas da cv AnaG01, independente do corretivo do solo, com maior atividade das 48 até as 96 hai, quando comparado com as plantas cv BRS Cauê (Fig. 2a, d). Na BRS

460 Cauê -Si, aumento na atividade da SOD também ocorreu a partir das 48 hai até o final do
461 período de avaliação (Fig. 2a). Nas plantas tratadas com fungicida 7 DAI, maior atividade da
462 SOD ocorreu nas plantas da +Si, independente da cultivar (Fig. 2b, p), no entanto, nas plantas
463 -Si um aumento na atividade da enzima ocorreu entre as 48 e 96 hai (Fig. 2b). Nas plantas
464 tratadas 15 DAI ocorreu maior AACPAE nas plantas +Si (Fig. 2d), com maior atividade entre
465 as 48 e 96 hai (Fig. 2c). Entretanto, nas plantas -Si também ocorreu incremento na atividade
466 da SOD entre as 48 e 96 hai, com maiores valores observados na AnaG01.

467 A atividade da CAT decresceu nas primeiras 48 hai, entretanto aumentou às 96 hai e voltou a
468 decrescer após esse período (Tabela S2). A atividade de CAT foi maior nas plantas de BRS
469 Cauê, em comparação a AnaG01, e nas plantas -Si em comparação as plantas +Si (Tabela S2).

470 Em relação a aplicação de fungicida, a aplicação 7 DAI resultou em menor atividade da CAT,
471 enquanto nas plantas tratadas aos 15 DAI a atividade aumentou (Tabela S2). Na ausência do
472 tratamento com fungicida, a maior atividade da CAT foi observada nas plantas -Si,
473 independente da cultivar (Fig. 2e, h). Nas plantas da AnaG01 ocorreu redução na atividade da
474 CAT às 48 hai e incremento às 72 hai, independente do tratamento com Si (Fig. 2e).

475 Incremento às 72 hai com posterior redução abrupta também foi verificado para a BRS Cauê,
476 especialmente plantas +Si (Fig. 2e). Nas plantas tratadas com fungicida, um pico na atividade
477 da CAT foi verificado às 72 hai, especialmente nas plantas -Si de ambas cultivares, e nas
478 plantas +Si da BRS Cauê (Fig. 2f, g). Os menores valores de atividade da CAT foram
479 verificados nas plantas tratadas aos 7 DAI, especialmente da AnaG01 +Si (Fig. 2 h),
480 entretanto aos 15 DAI a atividade aumentou em todos os tratamentos, exceto na AnaG01 +Si
481 que apresentou menor alteração (Fig. 2g, h). Nas plantas tratadas com fungicida 7 DAI, maior
482 atividade da CAT ocorreu nas plantas -Si da AnaG01 e em plantas da BRS Cauê (Fig. 2f, h).

483 **Tabela 1.** Análise da variância da área abaixo da curva de progresso da doença (AAPD), taxa de expansão da lesão (*r*) e severidade final da
484 mancha marrom em folhas de plantas de cevada.

Fonte de variação	Df	AAPD		<i>r</i>		Sev	
		Quadrado Médio ¹		Quadrado Médio ¹		Quadrado Médio ¹	
Cultivar (cv)	1	2423.2 **		1.198 **		221.4 **	
Corretivo de solo (cs)	1	6805.6 **		0.621 **		363.5 **	
Fungicida (fung)	2	17520.1 **		0.160 **		817.7 **	
cv × cs	1	14.0 ns		0.201 **		122.5 **	
cv × fung	2	1400.5 **		0.014 **		23.3 *	
cs × fung	2	23.1 ns		0.001 ns		55.7 **	
cv × cs × fung	2	119.4 **		0.017 **		29.8 **	

¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0.05 e **=0.01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung: fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação).

Tabela 2. Análise da variância da atividade das enzimas ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT), peroxidase (POX) e superóxido dismutase(SOD) em plantas inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

Fonte de variação	Df	APX		CAT		POX		SOD	
		Quadrado	Médio ¹	Quadrado	Médio ¹	Quadrado	Médio ¹	Quadrado	Médio ¹
Cultivar (cv)	1	0.0457	**	33.4526	**	0.4161	**	1944.5393	**
Corretivo de solo (cs)	1	0.0006	ns	114.6499	**	4.5954	**	3673.4912	**
Fungicida (fung)	2	0.0350	**	78.2045	**	1.5436	**	1208.8265	**
Horas após inoculação (hai)	5	0.1755	**	434.0614	**	3.4230	**	8355.7542	**
cv × cs	1	0.0200	**	113.1408	**	0.4959	**	739.3200	**
cv × fung	2	0.0939	**	65.4101	**	0.0253	**	1218.3248	**
cv × hai	5	0.0253	**	39.4927	**	0.4418	**	861.3674	**
cs × fung	2	0.0834	**	8.7901	**	0.7559	**	438.6015	**
cs × hai	5	0.1334	**	70.5164	**	0.6753	**	975.8318	**
fung × hai	10	0.0752	**	35.5891	**	0.4713	**	379.4521	**
cv × cs × fung	2	0.0219	**	7.8596	**	1.1600	**	31.5105	**
cv × cs × hai	5	0.0376	**	14.7033	**	0.3845	**	220.7624	**
cs × fung × hai	10	0.0794	**	8.5167	**	0.4010	**	342.4030	**
cv × fung × hai	10	0.0462	**	16.8537	**	0.1483	**	293.7507	**
cv × cs × fung × hai	10	0.0315	**	17.2444	**	0.2173	**	377.9228	**

¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0,05 e **=0,01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung: fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação); dai: dias após a inoculação (plantas saudas, 3 ou 10 dias após a inoculação).

487

488 **Tabela 3.** Análise da variância área abaixo da curva de progresso da atividade enzimática (AACPEA) das enzimas ascorbato peroxidase (APX),
 489 catalase (CAT), peroxidase (POX) e superóxido dismutase (SOD) em folhas de cevada inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

Fonte de variação	Df	AACPAE (APX)		AACPAE (CAT)		AACPAE (POX)		AACPAE (SOD)	
		Quadrado	Médio ¹	Quadrado	Médio ¹	Quadrado	Médio ¹	Quadrado	Médio ¹
Cultivar (cv)	1	100.981 **		103643.217 **		1904.996 **		6171538.15 **	
Corretivo de solo (cs)	1	24.884 **		361366.989 **		13058.185 **		11782684.86 **	
Fungicida (fung)	2	128.867 **		204069.173 **		4792.550 **		2510545.02 **	
cv × cs	1	40.317 **		201229.576 **		1779.005 **		1381578.31 **	
cv × fung	2	289.799 **		119298.561 **		44.957 **		3781501.59 **	
cs × fung	2	213.963 **		24873.718 **		1721.297 **		1672476.64 **	
cv × cs × fung	2	84.700 **		15834.679 **		3037.541 **		191183.96 **	

490 ¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0,05 e **=0,01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung:
 491 fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação).

A atividade da CAT decresceu nas primeiras 48 hai, entretanto aumentou às 96 hai e voltou a decrescer após esse período (Tabela S2). A atividade de CAT foi maior nas plantas de BRS Cauê, em comparação a AnaG01, e nas plantas -Si em comparação as plantas +Si (Tabela S2). Em relação a aplicação de fungicida, a aplicação 7 DAI resultou em menor atividade da CAT, enquanto nas plantas tratadas aos 15 DAI a atividade aumentou (Tabela S2). Na ausência do tratamento com fungicida, a maior atividade da CAT foi observada nas plantas -Si, independente da cultivar (Fig. 2e, h). Nas plantas da AnaG01 ocorreu redução na atividade da CAT às 48 hai e incremento às 72 hai, independente do tratamento com Si (Fig. 2e). Incremento às 72 hai com posterior redução abrupta também foi verificado para a BRS Cauê, especialmente plantas +Si (Fig. 2e). Nas plantas tratadas com fungicida, um pico na atividade da CAT foi verificado às 72 hai, especialmente nas plantas -Si de ambas cultivares, e nas plantas +Si da BRS Cauê (Fig. 2f, g). Os menores valores de atividade da CAT foram verificados nas plantas tratadas aos 7 DAI, especialmente da AnaG01 +Si (Fig. 2 h), entretanto aos 15 DAI a atividade aumentou em todos os tratamentos, exceto na AnaG01 +Si que apresentou menor alteração (Fig. 2g, h). Nas plantas tratadas com fungicida 7 DAI, maior atividade da CAT ocorreu nas plantas -Si da AnaG01 e em plantas da BRS Cauê (Fig. 2f, h). Tendência semelhante foi observado para a CAT nas plantas tratadas com fungicida 15 DAI, no entanto, o aumento na atividade de CAT foi mais pronunciado (Fig. 2g, h).

Atividade da POX aumentou nas folhas das plantas após a inoculação do patógeno (Tabela S2; Fig. 2i-l). De modo geral, a atividade da POX foi maior nas plantas da AnaG01 em relação a BRS Cauê, das plantas -Si em comparação as +Si, e nas plantas SF em comparação as plantas tratadas aos 7 ou 15 DAI (Tabela S2). Na ausência de fungicida, a atividade da POX aumentou nas plantas -Si a partir das 48 hai mantendo-se até as 120 hai (Fig. 2i, l). Incremento na atividade da POX também foi observada nas plantas +Si da AnaG01, com um pico máximo as 96hai (Fig. 2i, l). Plantas -Si da AnaG01, tratadas 7 ou 15

DAI, mantiverem atividade maior da CAT às 48 e 72 hai, resultando em maior AACPAE (Fig. 2j-l). Um pico de atividade da POX às 72 hai também foi observado na BRS Cauê -Si tratadas com fungicida 7 ou 15 DAI. Nas plantas +Si, independente da cultivar e do momento da aplicação do fungicida, foi observado tendência de aumento na atividade da POX, em relação as plantas sadias, a partir das 48 hai até o final do período avaliado (Fig. 2j-l).

De modo geral, a atividade da APX aumentou nas folhas das plantas após a inoculação do patógeno (Tabela S2; Fig. 2m-p). A APX foi maior nas plantas da AnaG01 em comparação a BRS Cauê, e aos 15 DAI em comparação aos 7 DAI e SF (Tabela S2). Na ausência do tratamento com fungicida (SF), a maior atividade da APX foi observada nas plantas cv AnaG01, independente do corretivo de solo, quando comparado com as plantas cv BRS Cauê (Tabela S2; Fig. 2m, p). Entretanto, um pico de atividade da APX nas folhas das plantas da BRS Cauê +Si ocorreu as 24 hai, com valor semelhante ao observado nas plantas cv AnaG01 -Si (Fig. 2m). Nas plantas tratadas com fungicida 7 dias antes da inoculação (DAI), aumento na atividade da APX ocorreu nas plantas da BRS Cauê +Si, as 120 hai, e nas plantas da AnaG01 às 24 e 72 hai, em plantas +Si, e às 48 e 72 hai para -Si (Fig. 2n, p). O oposto foi observado para a APX nas plantas tratadas com fungicida 15 DAI (Fig. 2o, p), onde na cv BRS Cauê -Si ocorreu um pico pronunciado às 72 hai e, semelhantemente, ocorreu nas plantas cv AnaG01 -Si (Fig. 2o, p). Entretanto, nas plantas -Si da BRS Cauê ocorreu maior atividade da APX, enquanto para a AnaG01, o aumento foi mais discreto, em comparação as plantas +Si (Fig. 2o, p).

3.3 Compostos fenólicos solúveis totais (CFST), derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG) e extravasamento de eletrólitos (EE)

A concentração dos compostos fenólicos solúveis totais (CFST), de derivados do ácido lignina-tioglicólico (DLATG), o extravasamento de eletrólitos (EE), a área abaixo da curva de progresso de derivados do ácido lignina-tioglicólico (AACPDLATG), a área abaixo da curva

de progresso de compostos fenólicos solúveis totais (AACPCFST), e a área abaixo da curva de progresso de extravasamento de eletrólitos (AACPEE) foram influenciados por todos os fatores, bem como suas interações analisadas estatisticamente ($P \leq 0.05$) (Tabela 4 e 5).

Para CFST, a inoculação reduziu o acúmulo em 8, 12 e 12% as 24, 72 e 120 hai respectivamente, quando comparadas com as plantas sadias (Tabela S3; Fig. 3a-d). Os decréscimos nas concentrações de CFST foram mais acentuados nas plantas -Si da BRS Cauê SF e 7 DAI, resultado nos menores valores da AACPCFST (Fig. 3d), e da AnaG01 aos 15 DAI (Fig. 3a-c). Entre cultivares, a AnaG01 apresentou concentração 6% maior nos CFST, quando comparado com a BRS Cauê (Tabela S3). O fornecimento de Si proporcionou aumento médio de 10% na concentração de CFST, quando comparado com as plantas -Si (Tabela S3), independentemente da cultivar e da aplicação de fungicida (Fig 3d). A concentração de CFST foi menor em 4 e 3% nas plantas tratadas com fungicida aos 7 e 15 DAI, respectivamente, quando comparado com as plantas sem fungicida (SF) (Tabela S3; Fig. 3a-d).

De modo geral, a inoculação das plantas incrementou a concentração de DLATG, em 14 e 13% às 24 e 72 hai, respectivamente, quando comparado com as plantas sadias (Tabela S3; Fig. 3e-g). Na análise das cultivares, a AnaG01 incrementou 9% na concentração de DLATG, quando comparado com a BRS Cauê (Tabela S3; Fig. 3e-h). As plantas +Si apresentaram maior concentração de DLATG, com acréscimo de 9% quando comparado com as plantas -Si (Tabela S3; Fig. 3e-h). O acréscimo na concentração de DLATG nas plantas +Si ocorreu principalmente nos horários de 24 e 72 hai, em comparação as plantas -Si, exceto para a AnaG01 aos 7 DAI que apresentou maior concentração às 72 hai (Fig. 3e-h).

Tabela 4. Análise da variância dos compostos fenólicos solúveis totais (CFST), derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG) e extravasamento de eletrólitos (EE) em folhas de cevada (*Hordeum vulgare*) inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

	Fonte de variação	Df	CFST		DLATG		EE	
			Quadrado Médio ¹		Quadrado Médio ¹		Quadrado Médio ¹	
564	Cultivar (cv)	1	49.5 **		116064.9 **		170.0 **	
565	Corretivo de solo (cs)	1	140.0 **		104845.1 **		1974.0 **	
566	Fungicida (fung)	2	7.6 **		16779.3 **		160.3 **	
567	Horas após inoculação (hai)	3	51.4 **		128041.8 **		1145.5 **	
568	cv × cs	1	7.6 **		3718.3 **		186.2 **	
569	cv × fung	2	14.6 **		980.1 **		6.5 *	
	cv × hai	3	3.3 **		44932.6 **		274.2 **	
	cs × fung	2	2.7 **		15689.6 **		57.8 **	
	cs × hai	3	37.3 **		47199.3 **		911.3 **	
	fung × hai	6	20.2 **		11018.7 **		119.1 **	
	cv × cs × fung	2	8.0 **		15628.3 **		30.1 **	
	cv × cs × hai	3	5.3 **		5639.8 **		49.4 **	
	cs × fung × hai	6	7.9 **		10946.3 **		184.0 **	
	cv × fung × hai	6	8.5 **		10359.2 **		66.4 **	
	cv × cs × fung × hai	6	3.8 **		9624.0 **		40.8 **	

¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0,05 e **=0,01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung: fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação); hai: amostragem em plantas saudas e às 24, 72 e 120 horas após a inoculação.

Tabela 5. Análise da variância área abaixo da curva de progresso da atividade enzimática (AACPEA) de folhas de cevada (*Hordeum vulgare*)

571 inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

Fonte de variação	Df	AACPDLATG		AACPCFST		AACPEE	
		Quadrado Médio ¹		Quadrado Médio ¹		Quadrado Médio ¹	
Cultivar (cv)	1	208537.8 **		593559152.6 **		273657.8 **	
Corretivo de solo (cs)	1	408852.0 **		714955452.4 **		12862581.9 **	
Fungicida (fung)	2	120560.6 **		116750237.5 **		969282.8 **	
cv × cs	1	2071.1 **		7218436.3 **		1558705.3 **	
cv × fung	2	10570.4 **		6965942.2 **		579681.7 **	
cs × fung	2	8905.6 **		101565268.9 **		1068859.9 **	
cv × cs × fung	2	15140.3 **		108290068.2 **		475030.6 **	

572 ¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0,05 e **=0,01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung:

573 fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação).

Nas plantas tratadas com fungicida a concentração de DLATG foi menor do que a das plantas sem fungicida (SF) (Tabela S3), entretanto o efeito das interações foi influenciado pela cultivar e pelo corretivo de solo (Fig. 3e-h).

Para EE, a inoculação aumentou o extravasamento em 34, 163 e 100% às 24, 72 e 120 hai, respectivamente, quando comparado com as plantas sadias (Tabela S3; Fig. 3i-l). Entre cultivares, a BRS Cauê apresentou maior EE (Tabela S3), especialmente quando as plantas não foram supridas com Si (Fig. 3i-l). Os maiores valores de EE ocorreram nas plantas -Si, 10% maior que a +Si (Tabela S3), independentemente da aplicação ou não de fungicida (Fig. 3i-l). Plantas tratadas com fungicida apresentaram maior EE, em média de 4 a 5%, em reação das plantas SF (tabela S3), especialmente nas plantas -Si (Fig. 3i-l).

3.4 Concentração foliar de Si

Os fatores cultivar e corretivo de solo foram significativos ($P \leq 0.05$) para a concentração foliar de Si (Fig. 4). A cv BRS Cauê apresentou acréscimo de 22% quando comparada com AnaG01 (Fig. 4). As plantas +Si apresentaram acréscimo de 30% quando comparadas com as -Si (Fig. 4).

4. Discussão

As respostas bioquímicas de defesa de plantas contra patógenos podem ser alteradas por diversos fatores como o estado nutricional da planta, fatores ambientais e as diferentes medidas de manejo, como a aplicação de fungicida (Debona et al., 2017; 2018; Rodrigues et al., 2017). Já é comprovado que o Si apresenta um importante papel na potencialização das respostas bioquímicas de defesa do hospedeiro (Dorneles et. al., 2017; 2018; Debona et al., 2017; Coskun et al., 2019; Victoria Arellano, et al., 2021), entretanto, o seu efeito, juntamente com a aplicação antecipada de fungicida, em folhas de cevada durante a infecção e colonização por *B. sorokiniana* ainda eram desconhecidas.

Nas folhas das plantas de cevada supridas Si e tratadas com fungicida, o dano causado por *B. sorokiniana* foi menor, conforme indicado pela menor AACPD e severidade final. A redução dessas variáveis é associada a redução na taxa de progresso da lesão (r), sugerindo que as alterações bioquímicas causadas pela maior concentração de Si nos tecidos foliares reduziram a velocidade de colonização pelo fungo. Em trigo, o fornecimento de Si, reduziu a intensidade da mancha marrom, causada por *B. sorokiniana*, devido alterar vários componentes de resistência, resultado explicado pela menor colonização das células da folha do hospedeiro pelo patógeno (Domiciano et al., 2010; 2013). Nestes estudos, a redução da intensidade da doença causada por *B. sorokiniana* foi parcialmente explicado por variações bioquímicas nas plantas +Si, como alteração da enzima do sistema antioxidante POX, da enzima chitinase, aumento na concentração de DLATG e CFST (Domiciano et al., 2010). No presente estudo, a alteração na atividade de enzimas do sistema antioxidante, na concentração de CFST e DLATG também foram alterados em resposta a presença do patógeno, indicando que

613 estão relacionados a mecanismos de defesa contra o patógeno ou como mecanismo para
614 contenção do seu dano.

615 Durante o período de estresse causado pelo ataque do patógeno sobre o tecido
616 foliar, a planta responde com a produção e acúmulo de EROs, em resposta ao dano a
617 estrutura celular, de organelas e suas funções. Desta forma, o sistema antioxidante age
618 para manter e/ou equilibrar a homeostase celular, através da ação de enzimas
619 antioxidantes, como tática para atenuar e minimizar a destruição gerada pela ação de
620 EROs (Verma et al., 2020; Ahammed e Yang, 2021).

621 No primeiro instante, a ativação da enzima SOD foi desencadeada após a
622 inoculação do patógeno, onde a atividade aumentou conforme o tempo após a chegada
623 do fungo sob a superfície foliar até o aparecimento dos sintomas da doença (entre 24 e
624 96 hai). A SOD é uma importante enzima antioxidante responsável na defesa das
625 plantas eliminando o anion superóxido, o qual causa efeito danosos a nível celular (Gill
626 e Tuteja, 2010).

627 Plantas supridas com Si incrementaram a atividade da SOD e reduziram
628 significativamente a atividade das enzimas antioxidantes CAT e POX nas plantas
629 inoculadas. Essas alterações enzimáticas indicam um favorecimento ao acúmulo de
630 H₂O₂ no tecido vegetal, o qual pode estar atuando como mecanismo de defesa,
631 especialmente durante a fase biotrófica de *B. sorokiniana*. Entretanto, na fase
632 necrotrófica de colonização, quando a presença de H₂O₂ é favorável ao patógeno, a
633 planta +Si estimulou a sua remoção conforme indicado pelo pico da atividade da CAT
634 as 72 hai e a redução da sua produção, pela da atividade da SOD, a partir das 96 hai.
635 Outros estudos demonstraram que em plantas de cevada inoculadas com *B. sorokiniana*,
636 a atividade da POX foi maior em genótipos suscetíveis, quando comparadas com

genótipos resistentes, o que pode indicar a atuação da enzima contra os danos oxidativos causados pela ação das toxinas do fungo (Kaur et al., 2021). Em trigo, também foi relatado o acréscimo na expressão de POX em plantas inoculadas com *B. sorokiniana* a qual apresentou correlação com o aumento de lesões foliares (Naz et al., 2018).

A enzima POX atua removendo EROs e, também, participa na formação de lignina, um importante mecanismo de defesa vegetal contra patógenos (Dorneles et al., 2017; Kaur et. al., 2021). Enquanto nas plantas -Si a atividade da POX aumentou desde as 48 hai, nas plantas +Si o aumento na sua atividade foi gradual até atingir o máximo entre 72 e 96 hai, coincidindo com as maiores concentrações de DLATG, especialmente na AnaG01. O incremento na concentração de DLATG foi associado ao aumento da resistência contra fungos do gênero *Bipolaris* em arroz e trigo (Domiciano et. al. 2010; Dallagnol et al., 2011; Eisa et al., 2013). Outra resposta de defesa que também foi mais intensa nas plantas supridas com Si foi o acúmulo de CFST. Os fenóis são importantes para reforço da parede celular e a formação de lignina, impedindo o desenvolvimento do patógeno através da polimerização celular, bem como pelo seu efeito deletério sobre o patógeno (Dorneles et al., 2018; Ahammed e Yang, 2021). O menor desenvolvimento da doença em plantas supridas com Si pode estar associado a produção de compostos antimicrobianos, como os compostos fenólicos e a deposição de lignina nas plantas após a penetração do patógeno (Fortunato et al., 2014; Wang et al., 2017). Neste sentido, o estudo mostrou que os metabólitos secundários atuaram negativamente sobre a infecção e a colonização do patógeno, promovendo, assim, a atenuação dos danos em plantas supridas com Si, principalmente sobre as da cultivar AnaG01.

A maior resistência nas plantas +Si também resultou em menor dano celular, especialmente em membranas, conforme indicado pelo EE. O fungo *B. sorokiniana* é

responsável pela produção de uma fitotoxina, o prehelminthosporol, capaz de agir sobre as atividades da membrana plasmática, bombeamento de prótons pela H^+ -ATPase, nos canais de Ca^{2+} -ATPase, promovendo maiores danos no tecido atacado (Kumar et. al., 2002). Assim, nas plantas sem o fornecimento de Si o EE foi mais pronunciado, evidenciando maior extravasamento do conteúdo citoplasmático celular. Olbe et al., (1995) relata que o extravasamento de Ca^{2+} do citoplasma, pode influenciar a ativação de enzimas antioxidantes do hospedeiro. Esse efeito pode explicar, parcialmente, a alteração na atividade enzimática observado nas plantas -Si, as quais devem ter agido como mecanismo de redução no dano celular ao invés da ação como mecanismos de defesa. Outro fator que deve ser considerado na análise da redução da intensidade da mancha marrom em cevada pelo Si, além da potencialização dos mecanismos de defesa, é a hipótese da obstrução apoplástica dos fatores de patogenicidade do patógeno pelo acúmulo de Si nos tecidos conforme descrito por Coskun et al (2019). Assim, a obstrução ou menor difusão no tecido das toxinas do patógeno reduzem a área afetada pelo fungo possibilitando, em tempo hábil, uma melhor resposta de defesa e a redução da intensidade da doença.

Na análise das cultivares, embora numericamente a concentração de Si tenha sido superior na BRS Cauê, o incremento na concentração foliar pelo fornecimento de Si no solo foi maior na AnaG01. Assim, de modo geral, a cv AnaG01 destacou-se pela menor intensidade da doença, através de menores valores de AACPD, r e severidade, pelas respostas de acúmulo de metabolitos secundários (CFST e DLATG) e enzimas como APX, POX e SOD.

A aplicação antecipada do fungicida interferiu negativamente na infecção e colonização de *B. sorokiniana*, proporcionando menores danos no tecido foliar e, quando associado a fertilização silicatada, o incremento do controle da mancha marrom

foi maior. Nas respostas de defesa, de modo geral, a aplicação de fungicida isoladamente conferiu baixa influência dentre as variáveis analisadas (enzimas POX e SOD; DLATG e CFST), no entanto, notou-se o seu efeito benéfico sob o EE, indicando a importância das aplicações preventivas sobre as plantas de cevada. Assim, os resultados indicam que a utilização de Si via solo, conjuntamente com a escolha de cultivares com maior resistência parcial e aplicações antecipadas de fungicida, podem conferir maior redução da mancha marrom da cevada.

Os tratamentos que tinham aliado a aplicação de fungicida e a adubação silicatada mostraram maior eficiência de controle de *B. sorokiniana*, tal fato pode ser observado pelo menor progresso da doença sobre as variáveis de resistência, onde, quando conciliado com a aplicação aos 15 DAI, e principalmente aos 7 DAI, incrementou o efeito de controle do patógeno sobre a superfície foliar.

Em conclusão, os resultados deste estudo demonstraram o efeito do Si sobre as plantas de cevada, aliado com a aplicação de fungicida, promoveu a ativação dos mecanismos bioquímicos relacionado a defesa das plantas de cevada, possibilitando a redução da mancha marrom.

Agradecimentos

T. M. Holz recebeu bolsa da Capes (Código de Financiamento 001). Prof. L. J. Dallagnol e K. R. Dorneles são apoiados por bolsas do CNPq (Processos 308149/2018-1 e 155829/2018-1). Esta pesquisa teve apoio da FAPERGS (19/2551-0001652-2 PQG/19). Agradecemos ao Laboratório de Fertilizantes – LAFER (UFU) pela realização das análises de Si no solo e foliar.

Referências

- 709
- 710 L. Agostinetto, R.T. Casa, A. Bogo, L. Alves, J.D.A.L. Vieira, M.D. Fingstag, J.M.D.
- 711 Rosa, Viability of seed-borne fungi *Alternaria alternata*, *Bipolaris sorokiniana* and
- 712 *Drechslera teres* in barley seeds in the south of Brazil, Summa Phytopathologica. 46
- 713 (2020) 26-30.
- 714 L. Agostinetto, R.T. Casa, A. Bogo, C. Sachs, C.A. Souza, E.M. Reis, I.C. da Cunha,
- 715 Barley spot blotch intensity, damage, and control response to foliar fungicide
- 716 application in southern Brazil, Crop Protection. 67 (2015) 7-12.
- 717 H. Akesson, E. Carlemalm, E. Everitt, T. Gunnarsson, Immunocytochemical
- 718 localization of phytotoxins in *Bipolaris sorokiniana*. Fungal Genetics Biology. 20
- 719 (1996) 205-216.
- 720 G. J. Ahammed, Y. Yang, Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in
- 721 plants. Plant Physiology and Biochemistry. 165 (2021) 200-206.
- 722 A.C. Alfenas, R.G. Mafia, Métodos em Fitopatologia. Viçosa. MG: Editora UFV.
- 723 (2007) 1-382.
- 724 S. F. Altschul, W. Gish, W. Miller, E. W. Myers, D. J. Lipman, Basic local alignment
- 725 search tool, Journal of molecular biology. 215 (1990) 403-410.
- 726 N. Antoniazzi, C. Deschamps, *Bipolaris sorokiniana* control and grain yield in barley
- 727 after application of elicitors and fungicide, Acta Scientiarum. Agronomy. 29 (2007)
- 728 695-700.
- 729 L.A.S. Azevedo, Manual de quantificação de doenças de plantas, Novartis Biociências-
- 730 Setor. (1997) 1-114.

- 731 J.T. Barba, E.M. Reis, C.A. Forcelini, Efeito do substrato na morfologia de conídios de
 732 *Bipolaris sorokiniana* e da densidade de inóculo na intensidade da mancha marrom em
 733 cevada, Fitopatologia brasileira. 29 (2004) 1-6.
- 734 M.S. Barber, J.P.A. Ride, Quantitative assay for induced lignification in wounded wheat
 735 leaves and its use to survey potential elicitors of the response, Physiological and
 736 Molecular Plant Pathology. 32 (1988) 185-197.
- 737 B. Bashyal, R. Chand, L. Prasad, A. Joshi, Partial resistance components for the
 738 management of spot blotch pathogen *Bipolaris sorokiniana* of barley (*Hordeum vulgare*
 739 L.), Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica. 46 (2011) 49-57.
- 740 R. Bélanger, R. Deshmukh, F. Belzile, C. Labbé, A. Perumal, S.M. Edwards, Plant with
 741 increased silicon uptake, Patent Application Publication. (2020) 1-209.
- 742 M.M. Bradford, A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram
 743 quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, Analytical
 744 biochemistry. 72 (1976) 248-254.
- 745 A. Castellani, Viability of some pathogenic fungi in distilled water. Journal of Tropical
 746 Medicine and Hygiene, 42 (1939) 225-226.
- 747 B. Chance, A.C. Maehly, Assay of catalases and peroxidases, Methods in Enzymology.
 748 2 (1955) 764-775.
- 749 D. Coskun, R. Deshmukh, H. Sonah, J.G. Menzies, O. Reynolds, J.F. Ma, R.R.
 750 Bélanger, The controversies of silicon's role in plant biology, New Phytologist. 221
 751 (2019) 67-85.

- 752 M.F.A. Cruz, M.O. Pinto, E.G. Barros, F.A. Rodrigues, Differential gene expression in
753 soybean infected by *Phakopsora pachyrhizi* in response to acibenzolar-S-methyl,
754 jasmonic acid and silicon, *Journal of Phytopathology*. 168 (2020) 571-580.
- 755 L.J. Dallagnol, F.A. Rodrigues, M.V.B. Mielli, J.F. Ma, L.E. Datnoff, Defective active
756 silicon uptake affects some components of rice resistance to brown spot,
757 *Phytopathology*. 99 (2009) 116-121.
- 758 L.J. Dallagnol, F.A. Rodrigues, F.M. DaMatta, M.V. Mielli, S.C. Pereira, Deficiency in
759 silicon uptake affects cytological, physiological, and biochemical events in the rice-
760 *Bipolaris oryzae* interaction, *Phytopathology*. 101 (2011) 92-104.
- 761 D. Debona, F.A. Rodrigues, L.E. Datnoff, Silicon's role in abiotic and biotic plant
762 stresses, *Annual Review of Phytopathology*. 55 (2017) 85-107.
- 763 D. Debona, A.A. Fortunato, L. Araújo, A.L.C. Rodrigues, F.A. Rodrigues, Rice defense
764 responses to *Bipolaris oryzae* mediated by a strobilurin fungicide, *Tropical Plant*
765 *Pathology*. 43 (2018) 389-401.
- 766 L.J. Dallagnol, A.E.R. Ramos, K.R. Dorneles, Silicon Use in the Integrated Disease
767 Management of Wheat: Current Knowledge, Current Trends in Wheat Research. (2020)
768 1-21.
- 769 G.P. Domiciano, F.A. Rodrigues, F.X.R. Vale, M.S. Xavier Filha, W.R. Moreira,
770 C.C.L. Andrade, S.C. Pereira, Wheat resistance to spot blotch potentiated by silicon,
771 *Journal of Phytopathology*. 158 (2010) 334-343.
- 772 G.P. Domiciano, F.A. Rodrigues, A. Guerra, F.X. Vale, Infection process of *Bipolaris*
773 *sorokiniana* on wheat leaves is affected by silicon, *Tropical Plant Pathology*. 38 (2013)
774 258-263.

- 775 J.A. Dominguez, F.J. Sautua, M.A. Carmona, Sensitivity of *Bipolaris sorokiniana* to
 776 strobilurin, triazole, and carboxamide premixes, Archives of Phytopathology and Plant
 777 Protection. (2021) 1-14.
- 778 K.R. Dorneles, L.J. Dallagnol, P.C. Pazdiora, F.A. Rodrigues, S. Deuner, Silicon
 779 potentiates biochemical defense responses of wheat against tan spot, Physiological and
 780 Molecular Plant Pathology. 97 (2017) 69-78.
- 781 K.R. Dorneles, P.C. Pazdiora, J.F. Hoffmann, F.C. Chaves, L.G. Monte, F.A.
 782 Rodrigues, L.J. Dallagnol, Wheat leaf resistance to *Pyrenophora tritici-repentis* induced
 783 by silicon activation of phenylpropanoid metabolism, Plant Pathology. 67 (2018) 1713-
 784 1724.
- 785 M. Eisa, R. Chand, A.K. Joshi, Biochemical and histochemical parameters associated
 786 with slow blighting of spot blotch (*Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem.) in wheat
 787 (*Triticum* spp.), Zemdirbyste-Agriculture. 100 (2013) 191-198.
- 788 J.T. Ferrari, E. Possamai, Incidência de *Bipolaris sorokiniana* nas sementes e
 789 transmissão para plantas de cevada, Revista de Ciências Agrárias. 38 (2015) 320-339.
- 790 A.A. Fortunato, W.L. da Silva, F.A. Rodrigues, Phenylpropanoid pathway is potentiated
 791 by silicon in the roots of banana plants during the infection process of *Fusarium*
 792 *oxysporum* f. sp. *cubens*, Phytopathology. 104 (2014) 597-603.
- 793 O.P. Gangwar, S.C. Bhardwaj, G.P. Singh, P. Prasad, S. Kumar, Barley disease and
 794 their management: An Indian perspective, Wheat and Barley Research. 10 (2018) 138-
 795 150.

- 796 C.N. Giannopolitis, S.K. Ries, Superoxide dismutases: II. Purification and quantitative
797 relationship with water-soluble protein in seedlings, *Plant physiology*. 59 (1977) 315-
798 318.
- 799 S.S. Gill, N. Tuteja, Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress
800 tolerance in crop plants, *Plant physiology and biochemistry*. 48 (2010) 909-930.
- 801 P.K. Gupta, R. Chand, N.K. Vasistha, S.P. Pandey, U. Kumar, V.K. Mishra, A.K. Joshi,
802 Spot blotch disease of wheat: the current status of research on genetics and breeding,
803 *Plant pathology*. 67 (2018) 508-531.
- 804 S. Kaur, R.D. Bhardwaj, J. Kaur, S. Kaur, Induction of Defense-Related Enzymes and
805 Pathogenesis-Related Proteins Imparts Resistance to Barley Genotypes Against Spot
806 Blotch Disease, *Journal of Plant Growth Regulation*. (2021) 1-15.
- 807 S.G. Kim, K.W. Kim, E.W. Park, D. Choi, Silicon-induced cell wall fortification of rice
808 leaves: a possible cellular mechanism of enhanced host resistance to blast,
809 *Phytopathology*. 92 (2002) 1095-1103.
- 810 G.H. Korndorfer, H.S. Pereira, O.A. Nolla, Análise de silício: solo, planta e fertilizante,
811 Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Boletim Técnico 2.
812 (2004) 34.
- 813 J. Kumar, R. Hüchelhoven, U. Beckhove, S. Nagarajan, K.H. Kogel, A compromised
814 Mlo pathway affects the response of barley to the necrotrophic fungus *Bipolaris*
815 *sorokiniana* (teleomorph: *Cochliobolus sativus*), *Phytopathology*. 91 (2001) 127-133.
- 816 J. Kumar, P. Schäfer, R. Hüchelhoven, G. Langen, H. Baltruschat, E. Stein, S.
817 Nagarajan, K.H. Kogel, *Bipolaris sorokiniana*, a cereal pathogen of global concern:

- 818 Cytological and molecular approaches towards better control, *Molecular Plant*
819 *Pathology*. 3 (2002) 185-195.
- 820 M. Kumar, R. Chand, R.S. Dubey, S. Kavita, Effect of Tricyclazole on morphology,
821 virulence and enzymatic alterations in pathogenic fungi *Bipolaris sorokiniana* for
822 management of spot blotch disease in barley, *World Journal of Microbiology and*
823 *Biotechnology*. 31 (2015) 23-35.
- 824 D.E. Mathre, *Compendium of Barley Diseases*, American Phytopathological Society.
825 St. Paul, MN. (1997) 1-78.
- 826 M.C. McDonald, D. Ahren, S. Simpfendorfer, A. Milgate, P.S. Solomon, The discovery
827 of the virulence gene ToxA in the wheat and barley pathogen *Bipolaris sorokiniana*,
828 *Molecular Plant Pathology*. 19 (2018) 432-439.
- 829 E. Minella, Indicações técnicas da cultura da cevada cervejeira nas safras 2015 e 2016,
830 *Embrapa Trigo*. 8 (2015) 1-106.
- 831 E. Minella, Indicações técnicas da cultura da cevada cervejeira nas safras 2019 e 2020
832 *Embrapa Trigo*. 10 (2019) 1-106.
- 833 H. Nakajima, Y. Toratsu, Y. Fujii, M. Ichinoe, T. Hamasaki, Biosynthesis of
834 sorokinianin, a phytotoxin of *Bipolaris sorokiniana*: Evidence of mixed origin from the
835 sesquiterpene and TCA pathways, *Tetrahedron letters*. 39 (1998) 1013-1016.
- 836 R. Naz, A. Nosheen, H. Yasmin, A. Bano, R. Keyani, Botanical-chemical formulations
837 enhanced yield and protection against *Bipolaris sorokiniana* in wheat by inducing the
838 expression of pathogenesis-related proteins, *PLoS ONE*. 13 (2018) 1-22.
- 839 F. Novakazi, O. Afanasenko, N. Lashina, G.J. Platz, R. Snowdon, I. Loskutov, F.
840 Ordon, Genome-wide association studies in a barley (*Hordeum vulgare*) diversity set

- 841 reveal a limited number of loci for resistance to spot blotch (*Bipolaris sorokiniana*),
 842 Plant Breeding. 139 (2020) 521-535.
- 843 M. Olbe, M. Sommarin, M. Gustafsson, T. Lundborg, Effect of the fungal pathogen
 844 *Bipolaris sorokiniana* toxin prehelminthosporol on barley root plasma membrane
 845 vesicles, Plant Pathology. 44 (1995) 625-635.
- 846 P.C. Pazdiora, K.R. Dorneles, T.N. Morello, P. Nicholson, L.J. Dallagnol, Silicon soil
 847 amendment as a complement to manage tan spot and fusarium head blight in wheat,
 848 Agronomy for Sustainable Development. 41(2021) 1-13.
- 849 E.M. Reis, R.T. Casa, Doenças da cevada: helmintosporioses (mancha em rede, mancha
 850 marrom e mancha estriada), Bayer. (2001) 1-46.
- 851 R.S. Resende, F.A. Rodrigues, R.V. Costa, D.D. Silva, Silicon and fungicide effects on
 852 anthracnose in moderately resistant and susceptible sorghum lines, Journal of
 853 Phytopathology. 161 (2013) 11-17.
- 854 F.A. Rodrigues, R.S. Resende, L.J. Dallagnol, L.E. Datnoff, Silicon potentiates host
 855 defense mechanisms against infection by plant pathogens, Silicon and plant diseases.
 856 (2015a) 109-138.
- 857 F.A. Rodrigues, L.J. Dallagnol, H.S.S. Duarte, L.E. Datnoff, Silicon control of foliar
 858 diseases in monocots and dicots, Silicon and plant diseases. (2015b) 67-108.
- 859 N. Sakr, Silicon reduces Fusarium Head Blight Development in Barley. The Open
 860 Agriculture Journal. 15 (2021) 54-65.
- 861 G. Shaner, R.E. Finney, The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-
 862 mildewing resistance in Knox wheat, Phytopathology. 67 (1977) 1051-1056.

- 863 P. Sharma, P. Arora, V. Verma, K. Khanna, P. Saini, R. Bhardwaj, Role and regulation
864 of ROS and antioxidants as signaling molecules in response to abiotic stresses, Plant
865 signaling molecules. 8 (2019) 141-156.
- 866 U.B. Singh, S. Singh, B. Malviya, N. Karthikeyan, M. Imran, R. Chaurasia, M. Alam, P.
867 Singh, B.K. Sarma, J.P. Rai, T. Damodaran, J.K. Tripathi, S. Kumar, A.K. Sharma,
868 Integration of anti-penetrant tricyclazole, signaling molecule salicylic acid and root
869 associated *Pseudomonas fluorescens* enhances suppression of *Bipolaris sorokiniana* in
870 bread wheat (*Triticum aestivum* L.), Journal Plant Pathology. 101 (2019) 943-954.
- 871 L. Tamas, I. Mistrik, V. Zelinova, Heavy metal-induced reactive oxygen species and
872 cell death in barley root tip, Environmental and Experimental Botany. 140 (2017) 34-
873 40.
- 874 M.A. Torres, ROS in biotic interactions, Physiologia plantarum. 138 (2010) 414-429.
- 875 K.K. Verma, X.H. Liu, K.C. Wu, R.K. Singh, Q.Q. Song, M.K. Malviya, Y.R. Li, The
876 impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under
877 different soil moisture levels, Silicon. 12 (2020) 1355-1367.
- 878 A.D. Victoria Arellano, G.M.D. Silva, E. Guatimosim, K.D.R. Dorneles, L.G. Moreira,
879 L.J. Dallagnol, Seeds coated with *Trichoderma atroviride* and soil amended with silicon
880 improve the resistance of *Lolium multiflorum* against *Pyricularia oryzae*, Biological
881 Control. 154 (2021) 1-14.
- 882 M. Wang, L. Gao, S. Dong, Y. Sun, Q. Shen, S. Guo. Role of silicon on plant-pathogen
883 interactions, Frontiers in Plant Science. 8 (2017) 701.

- 884 J. Wiese, H. Wiese, J. Schwartz, S. Schubert, Osmotic stress and silicon act additively
885 in enhancing pathogen resistance in barley against barley powdery mildew, Journal of
886 Plant Nutrition and Soil Science. 168 (2005) 269-274.
- 887 N. Yamaji, Y. Chiba, N. Mitani-Ueno, J.F. Ma, Functional Characterization of a Silicon
888 Transporter Gene Implicated in Silicon Distribution in Barley, Plant Physiology. 160
889 (2012) 1491-1497.
- 890 J.C. Zadoks, T.T. Chang, C.F. Konzak, A decimal code for the growth stages of cereals.
891 Weed research. 14 (1974) 415-421.

5. Anexos:

Tabela S1. Área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD), taxa de expansão da lesão (r) e severidade final (Sev) da mancha marrom, em plantas sadias ou aos 3 e 10 dias após a inoculação com *B. sorokiniana* em folhas de cevada.

	AACPD	r	Sev (%)
Cultivar			
AnaG01	49,4 b	0,353 b	8,5 b
BRS Cauê	63,6 a	0,669 a	12,8 a
Corretivo de solo			
-Si	68,4 a	0,624 a	13,4 a
+Si	44,6 b	0,397 b	7,9 b
Fungicida			
SF	92,2 a	0,621 a	18,6 a
7 DAI	26,9 c	0,425 c	4,8 c
15 DAI	50,4 b	0,486 b	8,6 b
CV%	6,1	4,0	2,2

Cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); Corretivo de solo (+Si: silicato de cálcio; -Si: calcário extrafino), Fungicida (SF: sem fungicida; 7 ou 15 DAI: aplicação preventiva aos 7 ou 15 dias antes da inoculação do fungicida epoxiconazol + fluxapirroxade + piraclostrobina).

899 **Tabela S2.** Atividade das enzimas ascorbato peroxidase (APX), catalase (CAT),
 900 peroxidase (POX) e superóxido dismutase (SOD) em plantas sadias ou em
 901 diferentes tempos após a inoculação de *Bipolaris sorokiniana* nas folhas de
 902 cevada (*Hordeum vulgare*).

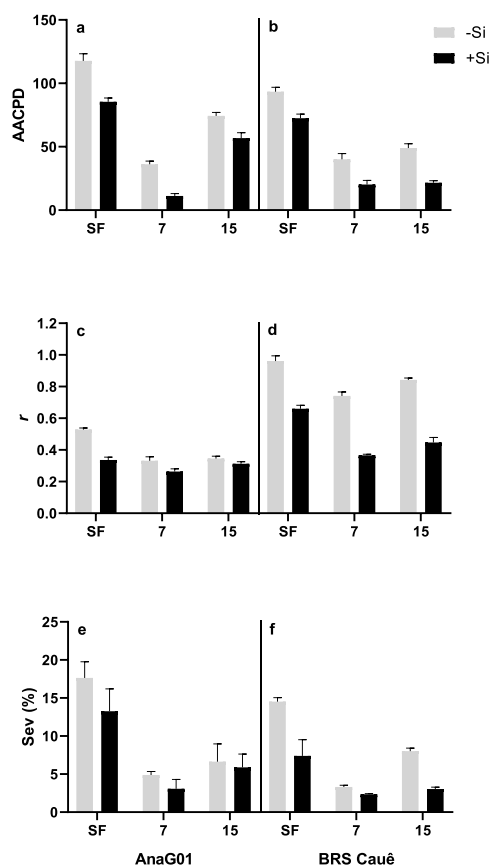
	APX	CAT	POX	SOD
Horas após a inoculação (hai)				
Sadia	0,29 d	8,64 c	0,44 f	31,79 e
24	0,33 b	9,45 b	0,59 e	32,48 e
48	0,31 cd	6,94 d	0,94 c	51,96 c
72	0,46 a	13,13 a	1,16 a	63,86 a
96	0,31 cd	6,22 e	0,98 b	56,35 b
120	0,32 bc	4,51 f	0,88 d	41,06 d
Cultivar				
AnaG01	0,35 a	7,81 b	0,87 a	48,85 a
BRS Cauê	0,32 b	8,49 a	0,79 b	43,65 b
Corretivo de solo				
-Si	0,33 a	8,78 a	0,96 a	42,68 b
+Si	0,34 a	7,52 b	0,71 b	49,82 a
Fungicida				
SF	0,33 b	8,36 b	0,97 a	50,35 a
7 DAI	0,32 c	7,16 c	0,73 c	44,21 b
15 DAI	0,36 a	8,93 a	0,80 b	44,19 b
CV%	7,1	3,7	3,0	5,5

903 Cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); Corretivo de solo (+Si: silicato de cálcio; -Si: calcário extrafino),
 904 Fungicida (SF: sem fungicida; 7 ou 15 DAI: aplicação preventiva aos 7 ou 15 dias antes da inoculação do
 905 fungicida epoxiconazol + fluxapiraxade + piraclostrobina)

906 **Tabela S3.** Derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG), compostos fenólicos
 907 solúveis totais (CFST) e extravasamento de eletrólitos (EE) em folhas de
 908 cevada (*Hordeum vulgare*) inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

	DLATG	CFST	EE
Horas após a inoculação (hai)			
Sadia	524,4 c	18,4 a	0,44 d
24	598,1 a	17,0 b	0,59 c
72	593,8 b	16,2 c	1,16 a
120	493,9 d	16,2 c	0,88 b
Cultivar			
AnaG01	577,4 a	17,5 a	60,4 b
BRS Cauê	528,2 b	16,4 b	62,2 a
Corretivo de solo			
-Si	529,2 b	16,1 b	64,5 a
+Si	575,9 a	17,8 a	58,1 b
Fungicida			
SF	567,8 a	17,3 a	59,5 b
7 DAI	535,6 c	16,6 c	62,5 a
15 DAI	554,2 b	16,9 b	61,9 a
CV%	1,1	1,7	2,1

909 Cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); Corretivo de solo (+Si: silicato de cálcio; -Si: calcário extrafino),
 910 Fungicida (SF: sem fungicida; 7 ou 15 DAI: aplicação preventiva aos 7 ou 15 dias antes da inoculação do
 911 fungicida epoxiconazol + fluxapiroxade + piraclostrobina).



912

913 **Fig. 1.** Área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), taxa de expansão da
 914 lesão (r) e severidade final (Sev) da mancha marrom em folhas de plantas de cevada
 915 (*Hordeum vulgare*) das cultivares AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo suprido com
 916 calcário extrafino (-Si) ou suprido com silicato de cálcio (+Si), não tratadas (SF) ou
 917 tratadas com fungicida preventivo (7 ou 15) dias antes da inoculação das plantas com
 918 *Bipolaris sorokiniana*.

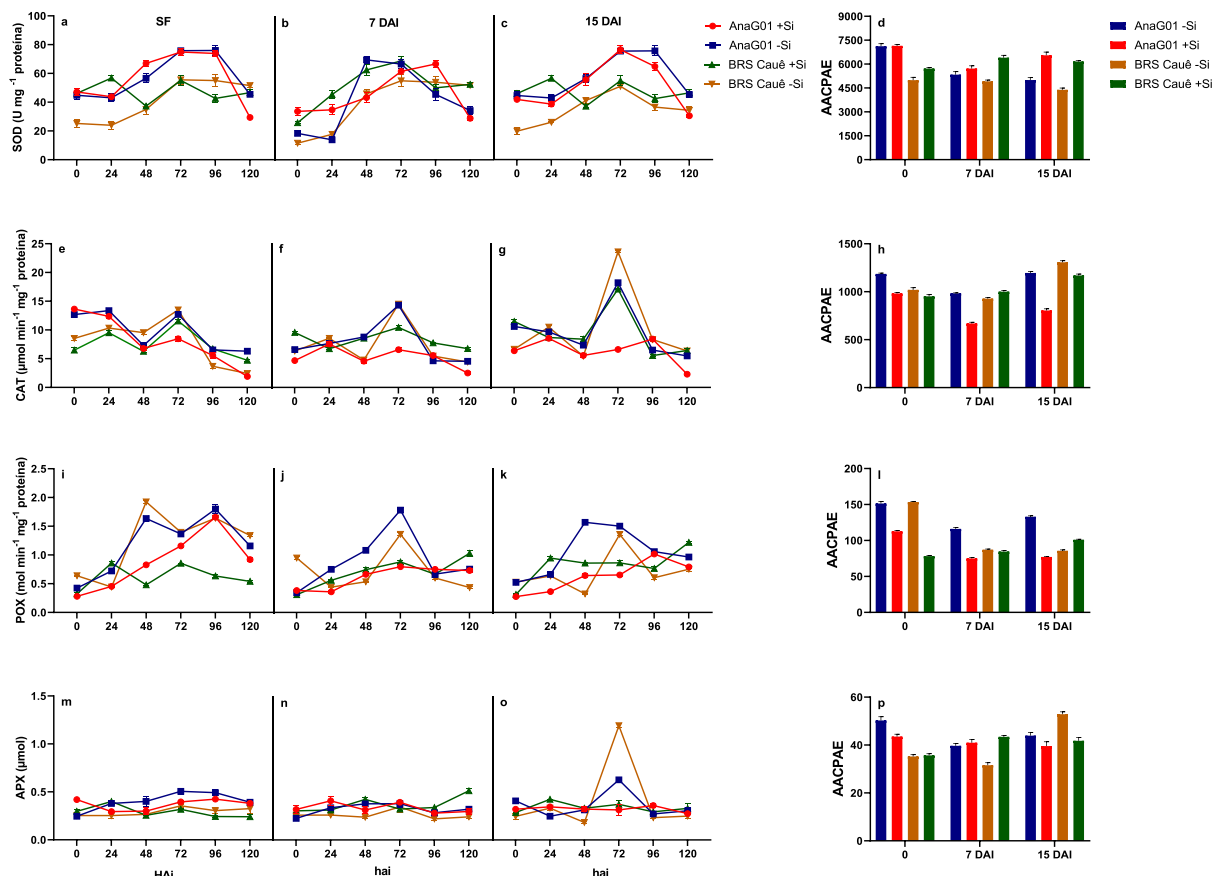


Fig. 2. Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) (a, b, c), catalase (CAT) (e, f, g), peroxidase (POX) (i, j, k) e ascorbato peroxidase (APX) (m, n, o) em folhas de plantas de cevada (*Hordeum vulgare*) das cultivares AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo suprido com calcário extrafino (-Si) ou suprido com silicato de cálcio (+Si), não tratadas (SF) ou tratadas com fungicida preventivo aos 7 (7 DAI) ou 15 (15 DAI) dias antes da inoculação. As amostragens foram coletadas em diferentes momentos, 0 (não inoculado), 24, 48, 72, 96 e 120, horas após inoculação (hai) das folhas com *Bipolaris sorokiniana*. Área abaixo da curva de progresso da atividade enzimática (AACPAE) (d, h, l, p) para cada tratamento. Cada ponto em uma linha de tendência representa a média de quatro replicações. As linhas verticais em cada ponto representam o desvio padrão da média.

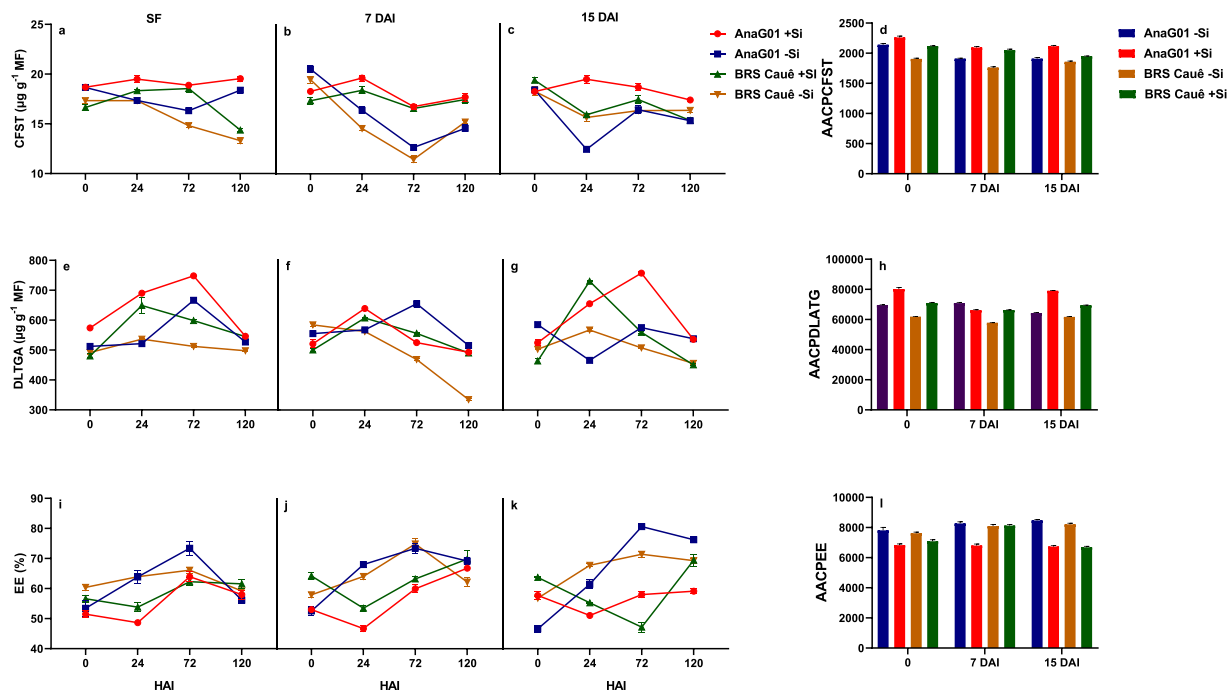
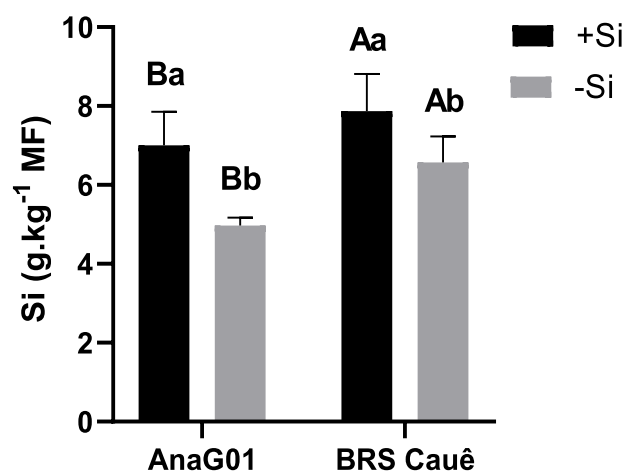


Fig. 3. Compostos fenólicos solúveis totais (CFST) (a, b, c), concentração dos derivados lignina-ácido tioglicólico (DLATG) (e, f, g), e extravasamento de eletrólitos (EE) (i, j, k) em folhas de cevada (*Hordeum vulgare*) das cv AnaG01 e cv BRS Cauê, cultivadas em solo não suprido com silício (-Si) ou solo suprido com silício (+Si), não tratadas (SF) ou tratadas com fungicida preventivo aos 7 (7 DAI) ou 15 (15 DAI) dias antes da inoculação. As amostragens foram coletadas em diferentes momentos, 0 (não inoculado), 24, 72 e 120, horas após inoculação (hai) das folhas com *Bipolaris sorokiniana*. Área abaixo da curva de progresso da atividade enzimática (AACPAE) (d, h, l) para cada tratamento. Cada ponto em uma linha de tendência representa a média de quatro repetições. As linhas verticais em cada ponto representam o desvio padrão da média.

944



945

946 **Fig. 4.** Concentração de silício (Si) em folhas de plantas de cevada das cultivares
947 AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo corrigido com silicato de cálcio (+Si) ou
948 calcário extrafino (-Si). Letras maiúsculas referem a cultivar e letras minúsculas a +Si e
949 -Si.

950 **3. Artigo 2 – Efeito da fertilização silicatada e aplicação de fungicida nas**
951 **respostas fotossintéticas em folhas de cevada desafiadas por *Bipolaris***
952 ***sorokiniana***

953 *Artigo redigido nas normas da revista "*Physiological and Molecular Plant*
954 *Pathology*" (versão em português).

955 **Efeito da fertilização silicatada e aplicação de fungicida nas respostas**
956 **fotossintéticas em folhas de cevada desafiadas por *Bipolaris sorokiniana***

957 Tailine M, Holz^a, Keilor R, Dorneles^a, Anderson E, Brunetto^a, Jai B, M, Massaut
958 Segundo^b, Heliur A, A, Delevatti^c, Gustavo M, Souza^c, Leandro J, Dallagnol^{a*}

959

960 ^a Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel,
961 Departamento de Fitossanidade, 96010-900, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

962 ^b Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel,
963 Departamento de Fitotecnia, 96010-900, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

964 ^c Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Biologia, Departamento de
965 Biologia/Fisiologia Vegetal, 13083-862, Campinas, São Paulo, Brasil.

966 ^d Universidade Federal de Pelotas, Instituto de Biologia, Departamento de Fisiologia
967 Vegetal, 96010-900, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil.

968 *E-mail:leandro.dallagnol@ufpel.edu.br

969 **Resumo**

970 A mancha marrom, causada por *Bipolaris sorokiniana*, é uma das principais doenças da
971 cevada, requerendo para seu manejo o uso de fungicidas, devido a utilização de
972 cultivares suscetíveis. Entretanto, o uso do silício (Si) tem demonstrado resultados
973 promissores na redução de danos causados por patógenos em diversos cereais, como na
974 cevada. Assim, neste estudo foi avaliado o efeito da suplementação de Si no solo,
975 combinada com a aplicação preventiva de fungicida (7 ou 15 dias antes da inoculação),
976 em duas cultivares (AnaG01 e BRS Cauê), na intensidade da mancha marrom, trocas
977 gasosas, e na concentração de pigmentos fotossintéticos quando infectados por *B.*
978 *sorokiniana*. As plantas foram cultivadas em casa de vegetação, com solo previamente
979 corrigido com silicato de cálcio (+Si) ou calcário extrafino (-Si) e aos 70 dias após a
980 semeadura, as plantas foram pulverizadas com fungicida (15 ou 7 dias antes da
981 inoculação). Plantas sem fungicida serviram de controle. A severidade e a taxa de
982 progresso da doença foram determinadas. As trocas gasosas e as concentrações de
983 pigmentos foram determinadas antes da inoculação (plantas sadias) e aos 3 e 10 dias
984 após a inoculação (*dai*). A mancha marrom reduziu a assimilação líquida de CO₂ (*A*), e
985 aos 10 *dai* reduziu também a condutância estomática (*g_s*), concentração interna de CO₂
986 (*Ci*) e taxa transpiratória (*E*). A concentração de clorofila total (CT) e clorofila *a* (Cla)
987 aumentou e as clorofila *b* (Clb) e carotenoides (Carot) reduziu nas plantas inoculadas.
988 Plantas +Si apresentam incremento na concentração foliar de Si, o que foi associado a
989 redução na intensidade da doença em até 15%, e incremento nas variáveis de trocas
990 gasosas (*A*, *g_s*, *Ci* e *E*) e na concentração dos pigmentos (CT, Cla, Clb e Carot).
991 Fungicida reduziu a intensidade da doença e incrementou as variáveis de trocas gasosas
992 (*A* e *g_s*) e a concentração de pigmentos. A associação de Si e fungicida conferiu maior
993 redução na intensidade da doença e a manutenção de um melhor estado fisiológico da
994 planta quando desafiada com *B. sorokiniana*.

995

996 Keywords: Mancha marrom; adubação silicatada; fungicida preventivo; pigmentos

997 fotossintéticos; fotossíntese

1. Introdução

O fungo *Bipolaris sorokiniana* (Sacc.) Shoem., agente causal da mancha marrom, é um dos patógenos mais frequentes na cultura da cevada, sendo encontrado em diferentes regiões produtoras de cereais de inverno no mundo, destacando-se em relevância nos continentes Americano, Asiático e Europeu (Singh et al., 2016; Gupta et al., 2018). *Bipolaris sorokiniana* afeta todos os órgãos da planta. Infecções nas partes subterrâneas, como raízes seminais e secundárias, bem como no mesocótilo e na coroa, resulta em podridões que afetam a absorção de água e nutrientes. Infecções dos órgãos verdes, como as folhas, colmos, bainhas, glumas e aristas, interferem na área fotossintética e no aproveitamento de fotoassimilados, levando a formação de grãos chochos e enrugados, que podem apresentar manchas de coloração marrom escuras próximas ao embrião (Agostinetto et al., 2015).

Patógenos interferem negativamente em diversos processos fisiológicos da planta, causando mudanças na transpiração, respiração, fotossíntese, permeabilidade de membranas, síntese de proteínas, potencial hídrico, absorção, translocação de água e nutrientes, e degradação de membranas celulares e pigmentos fotossintéticos (Rodrigues et al., 2017). Diversos estudos relatam que doenças foliares reduzem substancialmente o processo fotossintético da planta devido às limitações estomáticas e não estomáticas, oriundas da infecção e colonização dos tecidos da planta pelo patógeno (Dallagnol et al. 2011; Rios et. al. 2014; Debona et al., 2017). Os danos causados por patógenos foliares são decorrentes das reduções do tecido fotossinteticamente ativo, através do desenvolvimento de áreas com clorose e necrose, o qual é agravado com a evolução da doença, levando a redução dos fotoassimilados produzidos (Schreiber et. al. 2004), da diminuição das trocas gasosas na folha, e da redução da atividade fotoquímica relacionada ao fotossistema II (PSII) (Berger et al. 2007).

Devido à ausência de cultivares comerciais de cevada com resistência genética satisfatória a *B. sorokiniana* (Minella, 2015; Agostinetto et al., 2020), as estratégias para o manejo da mancha marrom nas áreas de cultivo são fundamentadas na redução do inóculo inicial, através de práticas como rotação de culturas, sementes saudáveis e tratamento de sementes com fungicidas (Antoniazzi e Deschamps, 2007). Entretanto, essas medidas não evitam a ocorrência de epidemias, e a fim de atenuar os danos causados pela doença, a aplicação de fungicida na parte aérea da planta têm sido uma importante medida de manejo da mancha marrom. Os fungicidas aplicados têm o objetivo de postergar e/ou reduzir o progresso da epidemia da mancha marrom durante o ciclo da cevada, visando a manutenção do potencial produtivo da planta e o máximo retorno econômico (Agostinetto et al., 2015). A aplicação de fungicida pode interferir na atividade de enzimas antioxidantes e promover alterações no balanço fotossintético nas plantas, contribuindo para elevação da taxa fotossintética e transpiratória, redução no nível de respiração, melhor eficiência do uso da água, atraso da senescência foliar, incremento da biomassa vegetal e de produtividade (Carrijo, 2014).

Outra alternativa que tem demonstrado efeito positivo na redução de doenças de plantas é o uso da fertilização silicatada, como fonte de silício (Si) solúvel, podendo ser uma possibilidade complementar no manejo da doença (Rodrigues et al., 2015; Debona et al., 2017). O efeito benéfico do Si já foi reportado em vários cereais de inverno, como trigo (Dallagnol et al., 2020; Pazdiora et al., 2021), aveia (Victoria Arellano, et al., 2021) e cevada (Wiese et al., 2005). Na cultura da cevada, o Si reduziu a severidade do oídio (*Blumeria graminis* f. sp. *hordei*) (Wiese et al., 2005; Wang et al., 2017) e da giberela (*Fusarium* spp) (Sakr, 2021).

Assim, a redução da intensidade de doenças pelo fornecimento de Si poderá implicar em melhor performance do metabolismo primário da planta. Estudos

demonstram que o uso do Si pode influenciar na fotossíntese líquida por, indiretamente, preservar o conteúdo de clorofila e potencializar as reações fotoquímicas associadas ao PSII (Fortunato et al. 2012, Rios et al. 2014; Rodrigues et al. 2015). A redução dos danos oriundos da ação do patógeno pelo Si previne a abrupta redução de variáveis relacionadas a trocas gasosas da planta como a assimilação líquida de CO₂ (A), a condutância estomática (g_s) e a taxa transpiratória (E) (Rios et al., 2014).

Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar o efeito da associação da fertilização silicatada no solo, como fonte de Si solúvel, com a aplicação foliar de fungicida nos parâmetros fotossintéticos de plantas de cevada desafiadas por *B. sorokiniana*. Para tal, as trocas gasosas e a concentração dos pigmentos fotossintéticos foram quantificadas em cultivares suscetíveis à mancha marrom, supridas ou não com fertilização silicatada, e sem ou com aplicação de fungicida aos 7 e 15 dias antes da inoculação.

2. Material e métodos

2.1. Material vegetal e cultivo

As cultivares de cevada AnaG 01 (Fapra-Agrária®) e BRS Cauê (Embrapa ®), ambas suscetíveis a mancha marrom, foram utilizadas nos experimentos. Estas cultivares foram selecionadas devido a semelhança na duração do ciclo, período de florescimento e amplo uso no mercado. As sementes foram semeadas em vasos plásticos (capacidade de 10 L) contendo 8 kg de solo. Em cada vaso foi cultivado 6 plantas. Durante todo o experimento, as plantas foram mantidas em casa de vegetação pertencente ao Departamento de Fitossanidade, da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” da Universidade Federal de Pelotas (RS). As temperaturas médias diárias variaram entre 4 e 26°C, e a umidade relativa entre 40 e 85%.

2.2. Características do solo, fertilização e aplicação dos corretivos de solo

As características físico-químicas do solo utilizado no estudo foram as seguintes: 54 g kg⁻¹ silte; 251 g kg⁻¹ argila; classe textural médio argiloso; pH em água 5.8; 12 mg dm⁻³ P; 6 mg dm⁻³ S; 5.8 mg dm⁻³ K; 3.1 cmolc dm⁻³ Ca; 1,7 cmolc dm⁻³ Mg, 0,6 cmolc dm⁻³ Al; 4,4 cmolc dm⁻³ H + Al; 53% saturação por bases; 1,99% matéria orgânica; Índice SMP 6. O solo utilizado foi peneirado e a correção da fertilidade química realizada conforme as indicações para a cultura da cevada (Minella, 2019). A aplicação de nitrogênio, na forma de ureia, foi de 0,24 mg kg⁻¹, onde 0,08 mg kg⁻¹ foi aplicado na semeadura, 0,08 mg kg⁻¹ no início do afilhamento e o restante no início do alongamento. As doses de P e K foram 0,07 mg kg⁻¹ P₂O₅ e 0,03 mg kg⁻¹ K₂O, respectivamente, aplicadas na semeadura.

A fonte de Si foi o silicato de cálcio (Agrosilício Plus®, Agronelli Insumos Agrícolas, Uberaba, Brasil), composto por 10,5% de Si, 25% de Ca e 6% de Mg, aplicado na dose equivalente a 13,2 toneladas ha⁻¹. Para isolar o efeito do Si, nos

tratamentos controle foi adicionado calcário extrafino (Dagoberto Barcelos, Caçapava do Sul, Brasil), composto por 25% de Ca e 15% de Mg, na dose de 11 toneladas ha⁻¹. As concentrações adicionadas de Ca e Mg entre os tratamentos foram ajustadas utilizando, separadamente, carbonatos de Ca e Mg. Os corretivos foram misturados ao solo de cada tratamento e incubados por 30 dias em sacos plásticos com a umidade próxima de 80% da capacidade de retenção de água do solo para que ocorresse a solubilização dos elementos minerais. Amostras coletadas após o período de incubação indicou concentração de Si disponível (extração em CaCl₂ 0.01 M) no solo de 23,7 mg kg⁻¹ para solo com silicato de cálcio, e 14,7 mg kg⁻¹ solo com calcário extrafino.

2.3 Delineamento experimental

O experimento foi disposto em delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial. Os fatores consistiram em cultivares (AnaG01 e BRS Cauê), corretivos no solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino), aplicação fungicida (7 e 15 dias antes da inoculação (DAI), ou sem aplicação) e tempo após a inoculação (plantas sadias, 3 e 10 dias), com quatro repetições. No total foram utilizados 48 vasos com seis plantas por vaso. O experimento foi realizado duas vezes.

2.4. Aplicação do fungicida

A aplicação do fungicida foi realizada aos setenta (70) dias da semeadura, durante o estágio fenológico 52 (segundo a escala de Zadoks, 1974). O fungicida epoxiconazol (50 g L) + fluxapiroxade (50 g L) + piraclostrobina (81 g L) (BASF®) na dose de 1,0 L ha⁻¹ foi aplicado de forma preventiva, aos sete (7) ou quinze (15) dias antes da inoculação da planta, a fim de avaliar seu efeito residual associado ao uso de silicato de cálcio, ou calcário extrafino, no momento da inoculação de *B. sorokiniana*. As aplicações foram efetuadas pela manhã, com temperatura de entre 17-22 °C, 70-80% UR, e velocidade do vento de 2-5 km h⁻¹. A aplicação foi realizada com um

1111 pulverizador costal pressurizado por CO₂, equipado com barra de 3 bicos, com pontas
1112 de jato plano em leque, série 110.02, espaçadas em 50 cm e calibradas para um volume
1113 de calda de 150 L ha⁻¹.

1114 2.5. *Obtenção do isolado e teste de patogenicidade*

1115 Amostras de sementes da cultivar BRS Cauê foram coletadas no Centro
1116 Agropecuário da Palma, da Universidade Federal de Pelotas, no município de Capão do
1117 Leão, RS. As sementes foram encaminhadas ao Laboratório de Interação Planta-
1118 Patógeno (LIPP), no departamento de Fitossanidade, da Universidade Federal de
1119 Pelotas. As sementes foram previamente desinfestadas em hipoclorito a 1% e água
1120 destilada. Realizou-se o método de papel filtro (Blotter test) conforme Neergard (1979),
1121 onde foram dispostas 25 sementes sobre papel mata borrão umedecido com solução
1122 restritora 8 MPa em caixas de plástico (Gerbox). Após a montagem, como caixas foram
1123 mantidas em BOD a temperatura de 20°C sob fotoperíodo de 12h. Aos sete dias de
1124 incubação, foram observadas as estruturas fúngicas sobre a superfície de sementes com
1125 o auxílio de lupa e isolado um esporo de *B. sorokiniana* afim de obter uma colônia
1126 monospórica em meio de cultura batata-dextrose-ágar (BDA) conforme Alfenas e Mafia
1127 (2007).

1128 A cepa de *B. sorokiniana* foi cultivada em BDA 7 dias a 26 °C, com fotoperíodo
1129 de 12 horas. Posteriormente, foi inoculado em plantas saudáveis plantas com 60 dias de
1130 idade (estádio de perfilhamento) da cultivar BRS Cauê através da suspensão por meio
1131 da pulverização da suspensão de esporos, ajustada para 1x10⁴ conídios por mL (Barba et
1132 al., 2004). e encaminhado a ambiente protegido de 22 a 29 °C, e relativo umidade de
1133 90%. As plantas foram analisadas quanto aos sintomas apresentados a cada 12 horas. As
1134 plantas controle foram borrifadas apenas com água.

2.6. Extração, amplificação e sequenciamento de DNA

O DNA genômico foi extraído de micélio cultivado em placas de PDA por 10 dias a 26 ° C, usando um kit de isolamento de DNA (Norgen, Ontário, Canadá) seguindo as instruções do fabricante. Duas regiões foram direcionadas para amplificação e sequenciamento por PCR e incluíram a gliceraldeído 3-fosfato desidrogenase (GAPDH) e 5,8S nrDNA com as regiões espaçadoras transcritas internas (ITS) e 28S DNA ribossômico (LSU). As amplificações de pcr, purificação de produtos de pcr, sequenciamento e edição de sequencias foward e reverse foi feita conforme ao descrito por Victoria Arellano et al., 2021. As sequências de consenso de cada locus foram comparadas em pesquisas de explosão com dados depositados no NCBI para determinar a identificação preliminar do isolado (Altschul et al. 1990).

2.7. Inoculação das plantas de cevada e armazenagem do isolado

O isolado do fungo foi repicado para placa de Petri contendo meio BDA, e foi encaminhado para câmara de incubação por sete dias a temperatura 25°C ± 3°C e fotoperíodo de 12h. No sétimo dia, os conídios produzidos foram coletados, com o auxílio da alça de Drigalski, em água destilada contendo 0,01% de Tween 20%, e a concentração ajustada para 1 x 10⁴ conídios mL⁻¹ (Barba et al., 2004).

A inoculação das plantas de cevada foi por meio da pulverização foliar da suspensão de esporos de *B. sorokiniana*, aos 85 dias após a emergência das plântulas (estádio 64 conforme escala fenológica de Zadoks, 1974) por meio da utilização de um borrifador manual (TECBLAS® 45 mL). Toda a superfície foliar de todas as plantas foram completamente cobertas pela pulverização, contudo sem provocar escorrimento superficial. Imediatamente após a inoculação, as plantas foram transferidas para uma câmara de nevoeiro com temperatura de 25 ± 3°C, onde permaneceram por 48h.

O isolado fúngico de *B. sorokiniana* (LIPP BITA01) utilizado nos estudos foi armazenado na Coleção de Fungos do Laboratório de Fungos Fitopatogênicos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas. A preservação do fungo foi em água destilada esterilizada e mantido em temperatura de 10°C (Castelani, 1939).

2.8. Avaliação da doença

A quantificação da doença, realizada em duas plantas por repetição, foi por meio da determinação da taxa de expansão de lesão (r) e da severidade da doença. A taxa r foi estimada com base nas mensurações de cinco lesões em uma folha de cada planta de cada repetição. As mensurações foram realizadas a cada 24 h após o aparecimento dos primeiros sintomas, totalizando dez avaliações. A severidade da mancha marrom foi estimada com base na proporção da área da folha atacada pela doença em relação a área total da folha de acordo com a escala diagramática descrita por Azevedo (1997). A partir dos dados da severidade foi calculada a área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) conforme fórmula proposta por Shaner & Finney (1977).

2.7. Determinação das trocas gasosas

As avaliações dos parâmetros fotossintéticos foram realizadas antes da inoculação do patógeno (plantas saudas) e aos três (3), a fim de verificar o efeito inicial da doença, e dez (10) dias após a inoculação das plantas com *B. sorokiniana*, após a colonização do tecido foliar pela doença. As medições foram realizadas no terço médio da folha bandeira-1 de uma planta por repetição, utilizando-se de um analisador de gases por infravermelho (IRGA), marca LI-COR, modelo LI – 6400 (LI-COR, Lincoln, NE, USA), no período das 9 às 13 horas. Os parâmetros fotossintéticos determinados foram: condutância estomática (g_s – mol m⁻¹ s⁻¹), taxa transpiratória (E – mol H₂O m⁻² s⁻¹), concentração interna de CO₂ (C_i – μmol mol⁻¹), e assimilação líquida de CO₂ (A -

1185 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). As medições foram realizadas sob CO_2 a 400 ppm, irradiância de 1.000
1186 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e temperatura de 28 °C.

1187 2.8. *Determinação da concentração dos pigmentos fotossintéticos*

1188 Antes da inoculação, aos três (3) e dez (10) dias após a inoculação, as folhas
1189 bandeira e bandeira-1 de duas plantas de cevada, por repetição, foram coletadas e
1190 armazenadas em ultra freezer a -70°C, até a realização da quantificação de clorofila *a*, *b*,
1191 total e carotenoides. A extração e a quantificação das clorofilas e carotenoides foram
1192 realizadas, segundo a metodologia utilizada por Dallagnol et al. (2011), com algumas
1193 modificações. Os resultados foram expressos em mg g^{-1} matéria fresca (MF).

1194 2.9. *Concentração foliar de Si*

1195 Ao final dos experimentos, para assegurar que as variações nas variáveis
1196 avaliadas foram devidas a diferenças nas concentrações de Si, amostras foliares foram
1197 coletadas, lavadas com água destilada e secas em estufa a 70° C, durante 72 horas. Em
1198 seguida as folhas foram moídas, em um moinho de facas até obter um pó fino, e,
1199 posteriormente, determinada a concentração foliar de Si em 0,1 g de matéria seca,
1200 conforme metodologia descrita por Korndorfer et al. (2004).

1201 2.10. *Análise dos dados*

1202 Para verificar a homogeneidade dos dados, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk,
1203 para todas as variáveis avaliadas nos experimentos. Os dados foram submetidos à
1204 análise de variância (ANOVA) e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de
1205 Tukey no software SAS (SAS Institute, 1989, Cary, NC).

3. Resultados

3.1. Componentes de resistência

Os fatores cultivar, corretivo de solo, e aplicação de fungicida foram significativos ($P \leq 0.05$) para todos os componentes de resistência (Tabela 1). Na cv AnaG 01 a AACPD, r e Sev foram 9, 35, e 14%, menores quando comparadas a cv BRS Cauê (Tabela S1; Fig. 1a-f). Nas plantas supridas com Si ocorreram reduções de 15 e 21 % na AACPD e r , respectivamente (Tabela S1). O maior efeito do Si na redução das variáveis relacionadas a doença foi observado nas plantas tratadas com fungicida 15 DAI (Fig. 1a-f). A aplicação de fungicida 7 ou 15 DAI, reduziu a AACPD em 83 e 57%, a r em 44 e 23%, e a SF em 83 e 53%, em comparação as plantas não tratadas com fungicida (Tabela S1; Fig. 1a-f).

3.2. Trocas gasosas

Os fatores cultivar, corretivo do solo, aplicação de fungicida, e dias após a inoculação (dai), bem como várias de suas interações, foram significativos ($P \leq 0.05$) para as variáveis de trocas gasosas (assimilação líquida de CO_2 (A), concentração interna de CO_2 (C_i), condutância estomática (g_s), e taxa respiratória (E)), porém o fator fungicida isoladamente não afetou de forma significativa os valores de E (Tabela 2).

A inoculação das plantas reduziu significativamente os valores de A em 27 e 10%, aos 3 e 10 *dai*, em comparação as plantas sadias (Tabela S2; Fig. 2a-c). A g_s , C_i , e E foram reduzidas em 60, 18 e 35% aos 10 *dai* (Tabela S2; Fig. 2f, i e l), enquanto que a aos 3 *dai* ocorreu aumento de 5% na C_i , em comparação as plantas sadias (Tabela S2; Fig. 2h).

Entre as cultivares, as variáveis A e E foram 17 e 6% maiores na BRS Cauê, enquanto g_s e C_i foram 12 e 5% menores, em comparação à cultivar AnaG01 (Tabela S2). BRS Cauê apresentou valor de A , discretamente superiores a AnaG01 em

Tabela 1. Análise da variância da área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), taxa de expansão da lesão (*r*) e a severidade final (Sev) da mancha marrom em folhas de plantas das cultivares (cv) AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo corrigido (corretivo de solo) com silicato de cálcio ou calcário extrafino, e não tratadas ou tratadas com fungicida (fung) 7 ou 15 dias antes da inoculação com *Bipolaris sorokiniana*.

Fonte de variação	Df	AACPD		<i>r</i>		Sev	
		Quadrado médio ¹		Quadrado médio ¹		Quadrado médio ¹	
Cultivar (cv)	1	676.8 *		0.13859 **		71.5 **	
Corretivo de solo (cs)	1	2115.4 **		0.044286 **		17.0 ns	
Fungicida (fung)	2	67418.4 **		0.080131 **		2371.5 **	
cv × cs	1	438.3 ns		0.003494 *		1.6 ns	
cv × fung	2	41.7 ns		0.025241 **		70.8 **	
cs × fung	2	854.71 **		0.013234 **		5.5 ns	
cv × cs × fung	2	323.4 ns		0.010054 **		0.3 ns	

¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0.05 e **=0.01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cv: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung: fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação).

Tabela 2. Análise da variância sobre as trocas gasosas, taxa fotossintética (A - $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), condutância estomática de vapores de água (gs - $\text{mol m}^{-1} \text{ s}^{-1}$), concentração interna de CO_2 (Ci - $\mu\text{mol mol}^{-1}$) e taxa transpiratória (E - $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em folhas de cevada (*Hordeum vulgare*) inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

	Fonte de variação	Df	A		gs		Ci		E	
			Quadrado médio¹		Quadrado médio¹		Quadrado médio¹		Quadrado médio¹	
1235	Cultivar (cv)	1	79.7 **		0.041 **		4995.9 **		1.180 *	
1236	Corretivo de solo (cs)	1	265.3 **		1.054 **		15292.5 **		40.937 **	
1237	Fungicida (fung)	2	23.9 **		0.007 **		808.4 *		0.248 ns	
	Dias após inoculação (dai)	2	64.2 **		0.304 **		60071.7 **		26.756 **	
	cv × cs	1	56.8 **		0.010 **		3340.3 **		0.081 ns	
	cs × fung	2	2.4 ns		0.014 **		453.8 ns		0.386 ns	
	cv × dai	2	12.1 **		0.031 **		3407.7 **		0.217 ns	
	cs × fung	2	1.3 ns		0.001 ns		227.2 ns		2.370 **	
	cs × dai	2	21.7 **		0.105 **		4357.1 **		9.736 **	
	fung × dai	4	10.2 **		0.029 **		2635.4 **		1.396 **	
	cv × cs × fung	2	3.9 ns		0.004 *		5137.8 **		0.075 ns	
	cv × cs × dai	2	5.6 *		0.020 **		2080.1 **		5.320 **	
	cs × fung × dai	4	7.4 **		0.004 **		478.9 ns		2.105 **	
	cv × fung × dai	4	5.2 *		0.013 **		1331.1 **		0.440 ns	
1238	cv × cs × fung × dai	4	5.2 *		0.003 *		2025.1 **		0.269 ns	

¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0,05 e **=0,01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung: fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação), dai: dias após a inoculação (plantas sadias, aos 3 e 10 dai).

plantas sadias (Fig. 2a), no entanto a diferença aumentou aos 3 *dai* (Fig. 2b) e aos 10 *dai* (Fig. 2c), especialmente nas plantas supridas com silício.

Plantas supridas com Si apresentaram valores, para todas as variáveis de trocas gasosas, maiores que às plantas -Si, sendo 33, 121, 8 e 40%, respectivamente para *A*, *Ci*, *g_s* e *E* (Tabela S2). O fornecimento de silício incrementou a *A* em plantas sadias (Fig. 2a), e manteve os valores maiores nas plantas inoculadas aos 3 *dai* (Fig. 2b) e aos 10 *dai* (Fig. 2c), especialmente para as da BRS Cauê tratadas com fungicida. No caso da *g_s*, os valores foram maiores nas plantas supridas com silício, em plantas sadias (Fig. 2d) e inoculadas (Fig. 2e e f). Nas plantas sadias e aos 3 *dai*, a *g_s* foi superior nas plantas da AnaG01 supridas com Si, em comparação a BRS Cauê, no entanto aos 10 *dai* os valores da *g_s* foram maiores na BRS Cauê, especialmente nas plantas tratadas com fungicida aos 7 DAI. O fornecimento de silício também conferiu maior *Ci* e *E* nas plantas sadias, com maior efeito na AnaG01 (Fig. 2g e j). Já nas plantas inoculadas, aos 3 *dai*, o fornecimento de silício favoreceu a manutenção da *Ci* e *E* maiores, entretanto, o efeito foi variável com a cultivar e a aplicação de fungicida (Fig. 2h e k).

A aplicação de fungicida não alterou significativamente os valores de *Ci* e *E*, no entanto, induziu um aumento em *A* de 16 e 10%, respectivamente aos 7 e 15 DAI, e a *g_s* maior 14% aos 7 DAI (Tabela S2). Nas plantas sadias, o efeito da aplicação do fungicida foi mais evidente nas plantas não supridas com silício para *A* e *g_s* (Fig. 2a e d). No entanto, para as plantas inoculadas, o efeito da aplicação do fungicida foi maior nas plantas supridas com silício da BRS Cauê aos 3 *dai* para *A* (Fig. 2b) e aos 10 *dai* para *g_s* (Fig. 2f), e na AnaG01 aos 10 *dai* para *A* (Fig. 2c).

3.3. Pigmentos fotossintéticos

Os fatores cultivar, corretivo de solo, aplicação de fungicida e dias após a inoculação, bem como suas interações, foram significativos ($P \leq 0.05$) para as

concentrações dos pigmentos fotossintéticos, exceto a interação cultivar $\times$ corretivo de solo para clorofila total (CT) e clorofila *a* (Cla) (Tabela 3).

Plantas inoculadas apresentaram incremento na concentração da CT em 9 e 5% (Tabela S3; Fig. 3a-c) e Carot em 11,0 e 11,2% (Tabela S3; Fig. 3j-l) aos 3 e 10 *dai*. A Cla aumentou em 8,6% aos 10 *dai* (Tabela S3; Fig. 3f) e a clorofila *b* (Clb) em 28% aos 3 *dai* (Tabela S3; Fig. 3h), em comparação as plantas sadias.

Na comparação das cultivares, a AnaG01 apresentou concentração maiores em 8, 3, 31, e 5% para CT, Cla, Clb, e Carot, respectivamente, em comparação a BRS Cauê (Tabela S3).

Plantas supridas com Si apresentaram concentrações maiores em 15, 10, 22, e 17% para CT, Cla, Clb e Carot, respectivamente, do que às plantas não supridas com o elemento (Tabela S3). O fornecimento de silício incrementou a CT nas plantas sadias (Fig. 3a), principalmente nas SF e nas tratadas 15 DAI, e, nas plantas inoculadas aos 3 *dai* (Fig. 3b), e aos 10 *dai* (Fig. 3c), especialmente da AnaG01, em comparação as plantas -Si. Plantas sadias supridas com Si apresentaram maior concentração de Cla (Fig. 3d), Clb (Fig. 3g), e Carot (Fig. 3j), em comparação as plantas -Si, quando SF ou 15 DAI, entretanto nas plantas tratadas 7 DAI, a concentração destes pigmentos foi maior nas plantas -Si. Nas plantas inoculadas, de modo geral, as concentrações de Cla (Fig. 3e, f) e Clb (Fig. 3h, i) foram maiores nas plantas supridas com Si, independente da cultivar ou tratamento com fungicida. Para a concentração de Carot, maior concentração ocorreu nas plantas supridas com Si da AnaG01 aos 3 *dai* (Fig. 3k), e da cultivar BRS Cauê aos 10 *dai* (Fig. 3l), independentemente da aplicação de fungicida.

Tabela 3. Análise da variância sobre os pigmentos fotossintéticos, clorofila total (CT - mg kg⁻¹ MF), clorofila *a* (Cla - mg kg⁻¹ MF), clorofila *b* (Clb - mg kg⁻¹ MF) e de carotenoides (Carot - mg kg⁻¹ MF) em plantas de cevada (*Hordeum vulgare*) inoculadas com *Bipolaris sorokiniana*.

Fonte de variação	Df	CT		Cla		Clb		Carot	
		Quadrado médio ¹		Quadrado médio ¹		Quadrado médio ¹		Quadrado médio ¹	
Cultivar (cv)	1	49494.0**		4309.2 **		64328.3 **		331.5 **	
Corretivo (cs)	1	148993.5**		31822.5 **		34151.7 **		2959.6 **	
Fungicida (fung)	2	2793.4**		13449.4 **		2432.7 **		28.7 *	
Dias após inoculação (dai)	2	23738.6**		10802.0 **		54096.0 **		674.7 **	
cv × cs	1	101.6 ns		242.1 ns		648.7 **		105.5 **	
cs × fung	2	7985.7 **		6136.2 **		2448.6 **		127.6 **	
cv × dai	2	9784.6 **		3343.8 **		5067.6 **		312.6 **	
cs × fung	2	2714.0 **		4739.0 **		206.5 **		1006.1 **	
cs × dai	2	12888.7 **		4808.6 **		253.8 **		155.5 **	
fung × dai	4	22308.4 **		5558.6 **		1259.3 **		290.6 **	
cv × cs × fung	2	3535.9 **		5738.6 **		4698.3 **		53.2 **	
cv × cs × dai	2	1225.4 **		1194.6 **		4137.7 **		786.5 **	
cs × fung × dai	4	5098.1 **		2919.8 **		394.1 **		626.7 **	
cv × fung × dai	4	2204.0 **		4288.6 **		2141.6 **		571.3 **	
cv × cs × fung × dai	4	3289.0 **		960.5 **		882.9 **		113.5 **	

¹ Níveis de probabilidade: ns= não significativo, *=0.05 e **=0.01. cv: cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); cs: corretivo de solo (silicato de cálcio ou calcário extrafino); fung: fungicida (sem aplicação, com aplicação aos 7 ou 15 dias antes da inoculação), dai: dias após a inoculação (plantas sadias, aos 3 e 10 dai).

Plantas tratadas com fungicida apresentaram maior concentração de CT, aos 15 DAI, Cla e Clb aos 7 e 15 DAI, em comparação as plantas não tratadas (Tabela S3). A aplicação de fungicida nas plantas sadias reduziu a concentração de CT da AnaG01 supridas com Si (Fig. 3a), e aumentou as concentrações de Cla, Clb e Carot da BRS Cauê -Si (Fig. 3d, g, e j). Nas plantas tratadas com fungicida e inoculadas, de modo geral, a concentração de CT e Clb foram menores nas plantas -Si das AnaG01 aos 3 *dai* (Fig. 3b e g), e a CT foi maior nas plantas -Si da BRS Cauê aos 10 *dai* (Fig. 3c), em comparação as plantas sem fungicida. Nas plantas supridas com Si, o tratamento com fungicida resultou em maior concentração de Cla aos 3 *dai* para BRS Cauê (Fig. 3e) e aos 10 *dai* para AnaG01 (Fig. 3f).

3.4. Concentração de Si na folha

Apenas para o fator corretivo foi significativo para a concentração de Si na folha, onde as plantas supridas com Si (+Si) apresentaram acréscimo de 18,8% quando comparadas com as plantas não supridas (-Si) (Fig. 4).

4. Discussão

Bipolaris sorokiniana causa danos significativos na produtividade de trigo e cevada em todo o mundo (Dominguez et al., 2021). Este estudo apresenta as primeiras evidências fisiológicas associadas ao suprimento de silício em plantas de cevada desafiadas por *B. sorokiniana* na presença de aplicação antecipada de fungicida. Estudos anteriores demonstraram o efeito positivo do Si na redução do dano de patógenos sobre a fotossíntese de plantas (Fortunato et al. 2012; Resende et al. 2012; Rios et al., 2014), no entanto, os efeitos do Si em folhas de cevada durante à infecção e colonização por *B. sorokiniana*, especificamente em relação à fotossíntese, ainda eram desconhecidos.

As plantas de cevada supridas com Si e tratadas com aplicação preventiva de fungicida apresentaram menor dano causado por *Bipolaris sorokiniana*, conforme indicado pela menor AACPD e r . A menor AACPD e r indicam que o avanço da doença nos tecidos da planta foi mais lento, fato que possibilitou a planta manter área foliar sadia por maior período de tempo.

Embora a infecção de *B. sorokiniana* nas folhas de cevada tenha comprometido as trocas gasosas, a aplicação de Si contribuiu para mitigar esse efeito. Por exemplo, aos 3 *dai*, A teve redução pronunciada em todos os tratamentos, no entanto, a redução nas plantas supridas com Si foi menor, especialmente da BRS Cauê tratadas com fungicida. A redução nos valores de A aos 3 *dai* provavelmente foi resultado de limitações não estomáticas, uma vez que houve aumento nos valores de C_i enquanto que a g_s não foi alterada, sendo esse efeito mais intenso nas plantas +Si. Isto indica que, em um primeiro instante (aos 3 *dai*), a disponibilidade foliar de CO_2 para a fotossíntese era elevada, sugerindo o suprimento de CO_2 não foi o fator principal relacionado a redução de A . Assim, a redução em A pode ter sido decorrente de uma menor eficiência de enzimas

responsáveis pela fixação fotossintética de CO₂, como a Rubisco (Rios et al., 2014). Adicionalmente, nas plantas +Si, esse resultado pode estar relacionado com a potencialização dos mecanismos de defesa da planta utilizando metabólitos intermediários da fotossíntese e o transporte de elétrons para a produção de compostos de defesa e reforço estrutural conforme relatado para *Fusarium oxysporum* f. sp. *Cubense*-banana e *C. miyabeanus*-arroz (Fortunato et al. 2012; Van Bockhaven et al., 2015; Ahammed e Yang, 2021).

O comportamento hemibiotrófico de *B. sorokiniana*, especialmente na fase inicial da patogênese, pode induzir a planta a produzir compostos de defesa semelhantes aos requeridos para defesa contra um patógeno biotrófico, nos quais a produção de acúmulo de espécies reativas de oxigênio é um importante mecanismo de defesa. Assim, conforme demonstrado em rosa-*Podosphaera pannosa* (Shetty et al., 2012) e trigo-*Pyrenophora tritici* (Dorneles et al., 2017; 2018), o Si pode potencializar a produção de compostos de defesa como H₂O₂, as quais podem ser produzidas juntamente a membrana plasmática, na mitocôndria, e no cloroplasto (Torres, 2010; Kumudini et al., 2018). Assim, sugere-se que a redução em *A* observado aos 3 *dai*, especialmente nas plantas +Si, com posterior aumento aos 10 *dai* quando a severidade da doença estava maior, sugere que a redução aos 3 *dai* foi devido a alocação pela planta de intermediários da fotossíntese para produção de compostos de defesa contra a fase biotrófica do patógeno, enquanto que o aumento em *A* aos 10 *dai* indica uma redução na utilização de intermediários da fotossíntese para defesa, e adaptação de mecanismos bioquímicos de defesa contra a fase necrotrófica do patógeno.

A diminuição em *g_s* é outro parâmetro importante que está relacionado ao comprometimento da atividade fotossintética em plantas afetadas por patógenos, reduzindo o influxo de CO₂ (Rios et al., 2014). Os valores de *g_s* foram drasticamente

reduzidos após a inoculação de *B. sorokiniana*, especialmente em plantas -Si, e aos 10 *dai*, resultado que pode explicar a redução em *E* aos 10 *dai* causada pelo fechamento estomático. Entretanto, outros fatores que possibilitam a redução em *E* são relacionados aos sintomas de murcha e ressecamento nas folhas (Rios et al., 2014), oriundos da intensa e rápida colonização de *B. sorokiniana* no tecido foliar.

A infecção por *B. sorokiniana* interferiu negativamente na concentração de pigmentos, principalmente nas plantas -Si. Esse resultado pode estar associado a atividade de enzimas líticas ou a liberação de toxinas não seletivas do patógeno durante o processo de colonização do tecido vegetal. *Bipolaris sorokiniana*, durante o estágio necrotrófico, induz o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (Kumar et. al., 2002), fato que pode ocasionar diminuição na concentração dos pigmentos fotossintéticos em consequência da degradação ou a restrição da síntese de clorofilas (Rios et al., 2014). Entretanto, nas plantas +Si, o progresso mais lento da doença possibilitou manter maior concentração de pigmentos devido ao menor dano causado pelo patógeno nos tecidos foliares. A preservação dos pigmentos fotossintéticos em plantas supridas com Si sob condições de estresse, devido ao melhor controle do estresse oxidativo, resultando em maior desempenho fotossintético já foi reportado em outras espécies vegetais (Dallagnol et al., 2013; Verma et al., 2020).

As cultivares utilizadas no estudo foram escolhidas pela similaridade do ciclo produtivo e por apresentarem suscetibilidade a *B. sorokiniana*, no entanto, de modo geral, a cv AnaG01 destacou-se pela menor intensidade da doença e manutenção dos pigmentos fotossintéticos, principalmente quando associada a adubação silicatada e aplicação antecipada de fungicida. Em estudo anterior a cv AnaG01 apresentou redução na incidência de mancha marrom na semente, especialmente quando cultivada na presença de Si solúvel no solo e com aplicação de fungicida (Holz et al., 2020).

Os dados deste estudo também demonstram que a aplicação do fungicida contribuiu para os maiores valores de A e g_s , além de maior incremento nos pigmentos fotossintéticos, principalmente nas plantas +Si. Assim, evidencia-se que a associação da fertilização silicatada da planta com a pulverização de fungicida incrementam o manejo da mancha marrom da cevada resultando na preservação dos pigmentos fotossintéticos e a manutenção de maior eficiência das trocas gasosas. Tomando esses dados em conjunto, sugere-se que o uso do Si no solo combinado com aplicações foliares de forma preventiva e a utilização de cultivares com maior resistência parcial contribuem para manter a doença em baixa intensidade, de modo que não seja comprometido a produtividade da cultura. Além disso, como perspectiva futura, poderia ser estudada a possibilidade de redução da concentração do fungicida associado a adubação silicatada, o que traria não apenas redução de custo da produção, mas também menor impacto ambiental.

Em conclusão, os resultados deste estudo demonstraram que o Si, aliado com a aplicação de fungicida, sobre as plantas de cevada proporcionou a manutenção dos parâmetros fisiológicos, como melhor desempenho das trocas gasosas e maiores concentrações de pigmentos fotossintéticos, sob o estresse biótico causado por *B. sorokiniana*.

Agradecimentos

T. M. Holz recebeu bolsa da Capes (Código de Financiamento 001). Prof. L. J. Dallagnol e K. R. Dorneles são apoiados por bolsas do CNPq (Processos 308149/2018-1 e 155829/2018-1). Esta pesquisa teve apoio da FAPERGS (19/2551-0001652-2 PQG/19). Agradecemos ao Laboratório de Fertilizantes – LAFER (UFU) pela realização das análises de Si no solo e foliar.

Referências

- 1403
- 1404 L. Agostinetto, R.T. Casa, A. Bogo, C. Sachs, C.A. Souza, E.M. Reis, I.C. da Cunha,
- 1405 Barley spot blotch intensity, damage, and control response to foliar fungicide
- 1406 application in southern Brazil, Crop Protection. 67 (2015) 7-12.
- 1407 L. Agostinetto, R.T. Casa, A. Bogo, L. Alves Neto, J.A.L. Vieira Junior, M.D. Fingstag,
- 1408 J.M. da Rosa, Viability of seed-borne fungi *Alternaria alternata*, *Bipolaris sorokiniana*
- 1409 and *Drechslera teres* in barley seeds in the south of Brazil, Summa Phytopathologica.
- 1410 46 (2020) 26-30.
- 1411 G. J. Ahammed, Y. Yang, Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in
- 1412 plants. *Plant Physiology and Biochemistry*. 165 (2021) 200-206.
- 1413 A.C. Alfenas, R.G. Mafia, Métodos em Fitopatologia, Editora UFV. 382 (2007) 53-90.
- 1414 S. F. Altschul, W. Gish, W. Miller, E. W. Myers, D. J. Lipman, Basic local alignment
- 1415 search tool, Journal of molecular biology. 215 (1990) 403-410.
- 1416 N. Antoniazzi, C. Deschamps, *Bipolaris sorokiniana* control and grain yield in barley
- 1417 after application of elicitors and fungicide. Acta Scientiarum Agronomy. 29 (2007) 695-
- 1418 700.
- 1419 L.A.S. Azevedo, Manual de quantificação de doenças de plantas, São Paulo: Novartis.
- 1420 (1997) 114.
- 1421 B. Bashyal, R. Chand, L. Prasad, A. Joshi, Partial resistance components for the
- 1422 management of spot blotch pathogen *Bipolaris sorokiniana* of barley (*Hordeum vulgare*
- 1423 L.), Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica. 46 (2011) 49-57.

- 1424 J.T. Barba, E.M. Reis, C.A. Forcelini, Efeito do substrato na morfologia de conídios de
 1425 *Bipolaris sorokiniana* e da densidade de inóculo na intensidade da mancha marrom em
 1426 cevada, Fitopatologia brasileira. 29 (2004) 1-6.
- 1427 S. Berger, A.K. Sinha, T. Roitsch, Plant physiology meets phytopathology: plant
 1428 primary metabolism and plant-pathogen inter-actions, Journal of experimental botany.
 1429 58 (2007) 4019-4026.
- 1430 D.R. Carrijo, Efeitos fisiológicos provocados pelo fungicida Fluxapirroxade, isolado e
 1431 em mistura com a Piraclostrobina, na cultura de soja, Dissertação (Mestrado em
 1432 Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, University of São Paulo,
 1433 Piracicaba. (2014).
- 1434 A. Castellani, Viabilidade de alguns fungos patogênicos em água destilada. Journal of
 1435 Tropical Medicine and Hygiene. 42 (1939) 225-226.
- 1436 D. Coskun, R. Deshmukh, H. Sonah, J.G. Menzies, O. Reynolds, J.F. Ma, R.R.
 1437 Bélanger, The controversies of silicon's role in plant biology, New Phytologist. 221
 1438 (2019) 67-85.
- 1439 V. D'Addazio, J.V.G. Silva, A.S. Jardim, L.L. Longue, R.A.A. Santos, A.A. Fernandes,
 1440 M.B. Silva, D.M. Silva, T.A. Santos, E.R. Schmildt, L.H. Pfenning, A.R. Falqueto,
 1441 Silicon improves the photosynthetic performance of black pepper plants inoculated with
 1442 *Fusarium solani* f. sp. *piperis*. Photosynthetica. 58 (2020) 692-701.
- 1443 L.J. Dallagnol, F.A. Rodrigues, S.C.V. Martins, P.C. Cavatte, F.M. DaMatta,
 1444 Alterations on rice leaf physiology during infection by *Bipolaris oryzae*, Australasian
 1445 Plant Pathology. 40 (2011) 360-365.

- 1446 L.J. Dallagnol, F.A. Rodrigues, A.R.M. Chaves, F.X.R. Vale, F.M. DaMatta,
 1447 Photosynthesis and sugar concentration are impaired by the defective active silicon
 1448 uptake in rice plants infected with *Bipolaris oryzae*, Plant Pathology. 62 (2013) 120-
 1449 129.
- 1450 L.J. Dallagnol, A.E.R. Ramos, K.R. Dorneles, Silicon Use in the Integrated Disease
 1451 Management of Wheat: Current Knowledge, Current Trends in Wheat Research. (2020)
 1452 1-21.
- 1453 L.E. Datnoff, W.H. Elmer, W. H., D.M. Huber, Mineral Nutrition and Plant Disease,
 1454 The American Phytopathological Society. (2007) 1-278.
- 1455 D. Debona, F.A. Rodrigues, L.E. Datnoff, Silicon's role in abiotic and biotic plant
 1456 stresses, Annual Review of Phytopathology. 55 (2017) 85-107.
- 1457 G.P. Domiciano, I.S. Cacique, C.C. Freitas, M.C.C. Filippi, F.M. DaMatta, F.X.R. Do
 1458 Vale, F.A. Rodrigues, Alterations in gas exchange and oxidative metabolism in rice
 1459 leaves infected by *Pyricularia oryzae* are attenuated by silicon, Phytopathology. 105
 1460 (2015) 738-747.
- 1461 J.A. Dominguez, F.J. Sautua, M.A. Carmona, Sensitivity of *Bipolaris sorokiniana* to
 1462 strobilurin, triazole, and carboxamide premixes, Archives of Phytopathology and Plant
 1463 Protection. (2021) 1-14.
- 1464 K.R. Dorneles, L.J. Dallagnol, P.C. Pazdiora, F.A. Rodrigues, S. Deuner, Silicon
 1465 potentiates biochemical defense responses of wheat against tan spot, Physiological and
 1466 Molecular Plant Pathology. 97 (2017) 69-78.
- 1467 K.R. Dorneles, P.C. Pazdiora, J.F. Hoffmann, F.C. Chaves, L.G. Monte, F.A.
 1468 Rodrigues, L.J. Dallagnol, Wheat leaf resistance to *Pyrenophora tritici-repentis* induced

- 1469 by silicon activation of phenylpropanoid metabolism, *Plant Pathology*. 67 (2018) 1713-
1470 1724.
- 1471 F. Fauteux, W. Rémus-Borel, J.G. Menzies, R.R. Bélanger, Silicon and plant disease
1472 resistance against pathogenic fungi, *FEMS microbiology letters*. 249 (2005) 1-6.
- 1473 A.A. Fortunato, F.A. Rodrigues, K.J.T. Nascimento, Physiological and biochemical
1474 aspects of the resistance of banana plants to *Fusarium* wilt potentiated by silicon,
1475 *Phytopathology*. 102 (2012) 957-966.
- 1476 O.P. Gangwar, S.C. Bhardwaj, G.P. Singh, P. Prasad, S. Kumar, Barley disease and
1477 their management: An Indian perspective, *Wheat and Barley Research*. 10 (2018) 138-
1478 150.
- 1479 P.K. Gupta, R. Chand, N.K. Vasistha, S.P. Pandey, U. Kumar, V.K. Mishra, A.K. Joshi,
1480 Spot blotch disease of wheat: the current status of research on genetics and breeding,
1481 *Plant pathology*. 67 (2018) 508-531.
- 1482 T.M. Holz, A.E. Brunetto, K.R. Dorneles, L.G. Moreira, W.M.V. Cruz, L.J. Dallagnol,
1483 Incidência de mancha marrom em sementes de cevada é suprimida com silício e
1484 fungicida, XXII Encontro de Pós-Graduação, Anais do XXII Encontro de Pós-
1485 Graduação. (2020) 1-4.
- 1486 G.H. Korndorfer, H.S. Pereira, O.A. Nolla, Análise de silício: solo, planta e fertilizante,
1487 Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, *Boletim Técnico* 2.
1488 (2004) 34.
- 1489 Kumudini, B. S., Jayamohan, N. S., Patil, S. V., & Govardhana, M. (2018). Primary
1490 plant metabolism during plant–pathogen interactions and its role in defense. *Plant*
1491 *Metabolites and Regulation Under Environmental Stress*, 215-229.

- 1492 A.O. Lavinsky, K.C. Detmann, J.V. Reis, R.T. Ávila, M.L. Sanglard, L.F. Pereira, F.M.
 1493 DaMatta, Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when
 1494 supplied during the reproductive growth stage, *Journal of Plant Physiology*. 206 (2016)
 1495 125-132.
- 1496 E. Minella, Indicações técnicas da cultura da cevada cervejeira nas safras 2015 e 2016,
 1497 Embrapa Trigo. 8 (2015) 1-106.
- 1498 E. Minella, Indicações técnicas da cultura da cevada cervejeira nas safras 2019 e 2020
 1499 Embrapa Trigo. 10 (2019) 1-106.
- 1500 P.C. Pazdiora, K.R. Dorneles, T.N. Morello, P. Nicholson, L.J. Dallagnol, Silicon soil
 1501 amendment as a complement to manage tan spot and fusarium head blight in wheat,
 1502 *Agronomy for Sustainable Development*. 41(2021) 1-13.
- 1503 E.M. Reis, R.T. Casa, Patologia de sementes de cereais de inverno. Embrapa Trigo.
 1504 (1998) 88.
- 1505 R.S. Resende, F.A. Rodrigues, P.C. Cavatte, S.C.V. Martins, W.R. Moreira, A.R.M.
 1506 Chaves, F.M. DaMatta, Leaf gas exchange and oxidative stress in sorghum plants
 1507 supplied with silicon and infected by *Colletotrichum sublineolum*, *Phytopathology*. 102
 1508 (2012) 892-898.
- 1509 J.A. Rios, F.A. Rodrigues, D. Debona, L.C. Silva, Photosynthetic gas exchange in
 1510 leaves of wheat plants supplied with silicon and infected with *Pyricularia oryzae*, *Acta*
 1511 *Physiologiae Plantarum*. 36 (2014) 371-379.
- 1512 F.A. Rodrigues, L.J. Dallagnol, H.S.S. Duarte, L.E. Datnoff, Silicon Control of Foliar
 1513 Diseases in Monocots and Dicots, *Silicon and Plant Diseases*, Switzerland:
 1514 Springer. (2015) 67-108.

- 1515 F.A. Rodrigues, J.A. Rios, D. Debona, C.E. Aucique-Pérez, *Pyricularia oryzae*-wheat
 1516 interaction: physiological changes and disease management using mineral nutrition and
 1517 fungicides. *Tropical Plant Pathology*, 42 (2017) 223-229.
- 1518 N. Sakr, Silicon reduces Fusarium Head Blight Development in Barley. *The Open*
 1519 *Agriculture Journal*. 15 (2021) 54-65.
- 1520 U. Schreiber, Pulse-Amplitude-Modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse
 1521 method, *Chlorophyll a fluorescence: a signature of photosynthesis*, Springer,
 1522 Dordrecht. 19 (2004) 1-42.
- 1523 G. Shaner, R.E. Finney, The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow-
 1524 mildewing resistance in Knox wheat, *Phytopathology*. 67 (1977) 1051-1056.
- 1525 P. Sharma, P. Arora, V. Verma, K. Khanna, P. Saini, R. Bhardwaj, Role and regulation
 1526 of ROS and antioxidants as signaling molecules in response to abiotic stresses, *Plant*
 1527 *signaling molecules*. 8 (2019) 141-156.
- 1528 R. Shetty, B. Jensen, B.P. Shetty, M. Hansen, C.W. Hansen, K.R. Starkey, H.J.L.
 1529 Jørgensen, Silicon induced resistance against powdery mildew of roses caused by
 1530 *Podosphaera pannosa*, *Plant pathology*. 61 (2012) 120-131.
- 1531 K. Singh, Cross infectivity and comparative genomics of *Bipolaris sorokiniana* and
 1532 *Bipolaris oryzae* for characterization of pathogenicity related genes in wheat and rice,
 1533 Doctoral dissertation, Division of Plant Pathology Icar-Indian Agricultural Research
 1534 Institute, New Delhi-. (2016).
- 1535 J. Van Bockhaven, K. Steppe, I. Bauweraerts, S. Kikuchi, T. Asano, M. Höfte, D. De
 1536 Vleeschauwer, Primary metabolism plays a central role in moulding silicon-inducible
 1537 brown spot resistance in rice, *Molecular Plant Pathology*. 16 (2015) 811-824.

- 1538 M.A. Torres, ROS in biotic interactions, *Physiologia plantarum*. 138 (2010) 414-429.
- 1539 K.K. Verma, X.H. Liu, K.C. Wu, R.K. Singh, Q.Q. Song, M.K. Malviya, Y.R. Li, The
1540 impact of silicon on photosynthetic and biochemical responses of sugarcane under
1541 different soil moisture levels, *Silicon*. 12 (2020) 1355-1367.
- 1542 A.D. Victoria Arellano, G.M.D. Silva, E. Guatimosim, K.D.R. Dorneles, L.G. Moreira,
1543 L.J. Dallagnol, Seeds coated with *Trichoderma atroviride* and soil amended with silicon
1544 improve the resistance of *Lolium multiflorum* against *Pyricularia oryzae*, *Biological*
1545 *Control*. 154 (2021) 1-14.
- 1546 M. Wang, L. Gao, S. Dong, Y. Sun, Q. Shen, S. Guo. Role of silicon on plant-pathogen
1547 interactions, *Frontiers in Plant Science*. 8 (2017) 701.
- 1548 J. Wiese, H. Wiese, J. Schwartz, S. Schubert, Osmotic stress and silicon act additively
1549 in enhancing pathogen resistance in barley against barley powdery mildew, *Journal of*
1550 *Plant Nutrition and Soil Science*. 168 (2005) 269-274.
- 1551 J.C. Zadoks, T.T. Chang, C.F. Konzak, A decimal code for the growth stages of cereals.
1552 *Weed research*. 14 (1974) 415-421.

1553 **Tabela S1.** Área abaixo da curva do progresso da doença (AACPD), taxa de expansão
 1554 da lesão (r) e severidade final (Sev) da mancha marrom, em plantas sadias ou
 1555 aos 3 e 10 dias após a inoculação com *B. sorokiniana* em folhas de cevada.

	AACPD	r	Sev
Cultivar			
AnaG 01	78,0 b	0,198 b	14,6 b
BRS Cauê	85,5 a	0,304 a	17,1 a
Corretivo de solo			
-Si	88,4 a	0,282 a	16,495 a
+Si	75,2 b	0,221 b	15,3 a
Fungicida			
SF	153,2 a	0,324 a	29,1 a
7 DAI	26,3 c	0,182 c	5,2 c
15 DAI	65,9 b	0,248 b	13,2 b
CV%	15,6	10,1	18,1

1556 Cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); Corretivo de solo (+Si: silicato de cálcio; -Si: calcário extrafino),
 1557 Fungicida (SF: sem fungicida; 7 ou 15 DAI: aplicação preventiva aos 7 ou 15 dias antes da inoculação do
 1558 fungicida epoxiconazol + fluxapirroxade + piraclostrobina)

1559 **Tabela S2.** Taxa fotossintética (A), condutância estomática de vapores de água (g_s),
 1560 concentração interna de CO₂ (C_i) e taxa transpiratória (E) em folhas de plantas
 1561 de cevada sadias ou aos 3 e 10 dias após a inoculação (dai) com *Bipolaris*
 1562 *sorokiniana*.

	A ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	g_s ($\text{mol m}^{-1} \text{s}^{-1}$)	C_i ($\mu\text{mol mol}^{-1}$)	E ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Dias após a inoculação (dai)				
Sadia	10,77 a	0,28 a	291,6 b	3,57 a
3 dai	8,45 c	0,27 a	305,7 a	3,66 a
10 dai	9,65 b	0,13 b	238,6 c	2,32 b
Cultivar				
AnaG 01	8,88 b	0,24 a	284,5 a	3,09 b
BRS Cauê	10,37 a	0,21 b	272,8 b	3,28 a
Corretivo de solo				
-Si	8,27 b	0,14 b	268,3 b	2,65 b
+Si	10,98 a	0,31 a	289,0 a	3,79 a
Fungicida				
SF	8,87 b	0,21 b	281,2 a	3,24 a
7 DAI	9,74 a	0,24 a	280,8 a	3,10 a
15 DAI	10,27 a	0,22 b	273,9 a	3,21 a
CV%	13,0	13,3	5,5	13,9

1563 Cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); Corretivo de solo (+Si: silicato de cálcio; -Si: calcário extrafino),
 1564 Fungicida (SF: sem fungicida; 7 ou 15 DAI: aplicação preventiva aos 7 ou 15 dias antes da inoculação do
 1565 fungicida epoxiconazol + fluxapiroxade + piraclostrobina)

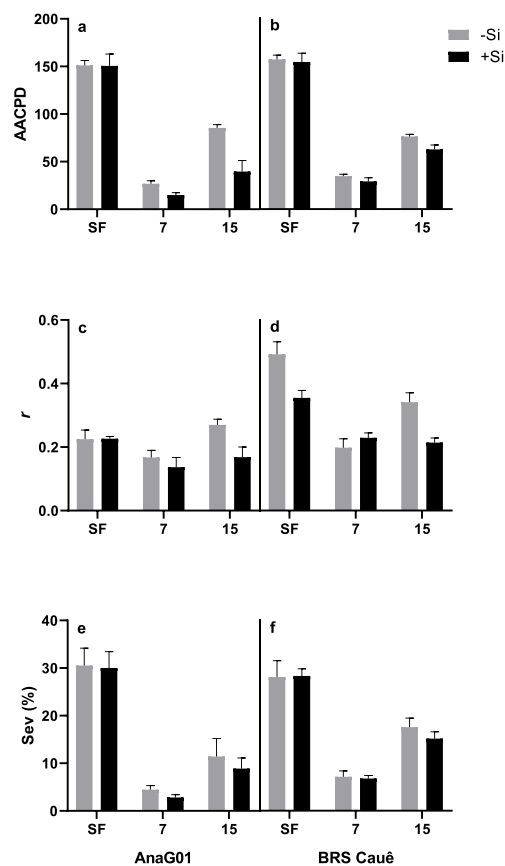
1566 **Tabela S3.** Concentração de clorofila total (CT), *a* (Cla), *b* (Clb) e carotenoides (Carot)
 1567 em plantas sadias ou aos 3 e 10 dias após a inoculação (dai) com *Bipolaris*
 1568 *sorokiniana* em folhas de cevada.

1569

	CT (mg kg ⁻¹ MF)	Cla (mg kg ⁻¹ MF)	Clb (mg kg ⁻¹ MF)	Carot (mg kg ⁻¹ MF)
Dias após a inoculação (dai)				
Sadia	433,75 c	277,74 b	138,81 b	51,77 b
3 dai	478,08 a	278,55 b	193,51 a	58,19 a
10 dai	459,04 b	304,12 a	132,44 c	58,34 a
Cultivar				
AnaG 01	475,50 a	292,27 a	176,06 a	57,62 a
BRS Cauê	438,42 b	281,33 b	133,79 b	54,58 b
Corretivo de solo				
-Si	424,79 b	271,94 b	139,52 b	51,57 b
+Si	489,12 a	301,67 a	170,32 a	60,63 a
Fungicida				
SF	450,00 b	270,67 c	149,47 c	55,60 a
7 DAI	455,76 b	285,65 b	162,98 a	56,99 a
15 DAI	465,11 a	304,09 a	152,32 b	55,70 a
CV%	3,0	3,1	2,0	5,2

1570 Cultivares (AnaG01 e BRS Cauê); Corretivo de solo (+Si: silicato de cálcio; -Si: calcário extrafino),
 1571 Fungicida (SF: sem fungicida; 7 ou 15 DAI: aplicação preventiva aos 7 ou 15 dias antes da inoculação do
 1572 fungicida epoxiconazol + fluxapiroxade + piraclostrobina)

1573



1574

1575 **Fig. 1.** Área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), tamanho de lesão (r) e
 1576 a severidade final (Sev) da mancha marrom (*Bipolaris sorokiniana*) em folhas das
 1577 plantas de cevada das cultivares AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo corrigido com
 1578 calcário extrafino (-Si) ou silicato de cálcio (+Si), sem aplicação de fungicida (SF) ou
 1579 tratadas com fungicida preventivo aos 7 ou 15 (7 ou 15) dias antes da inoculação (DAI).

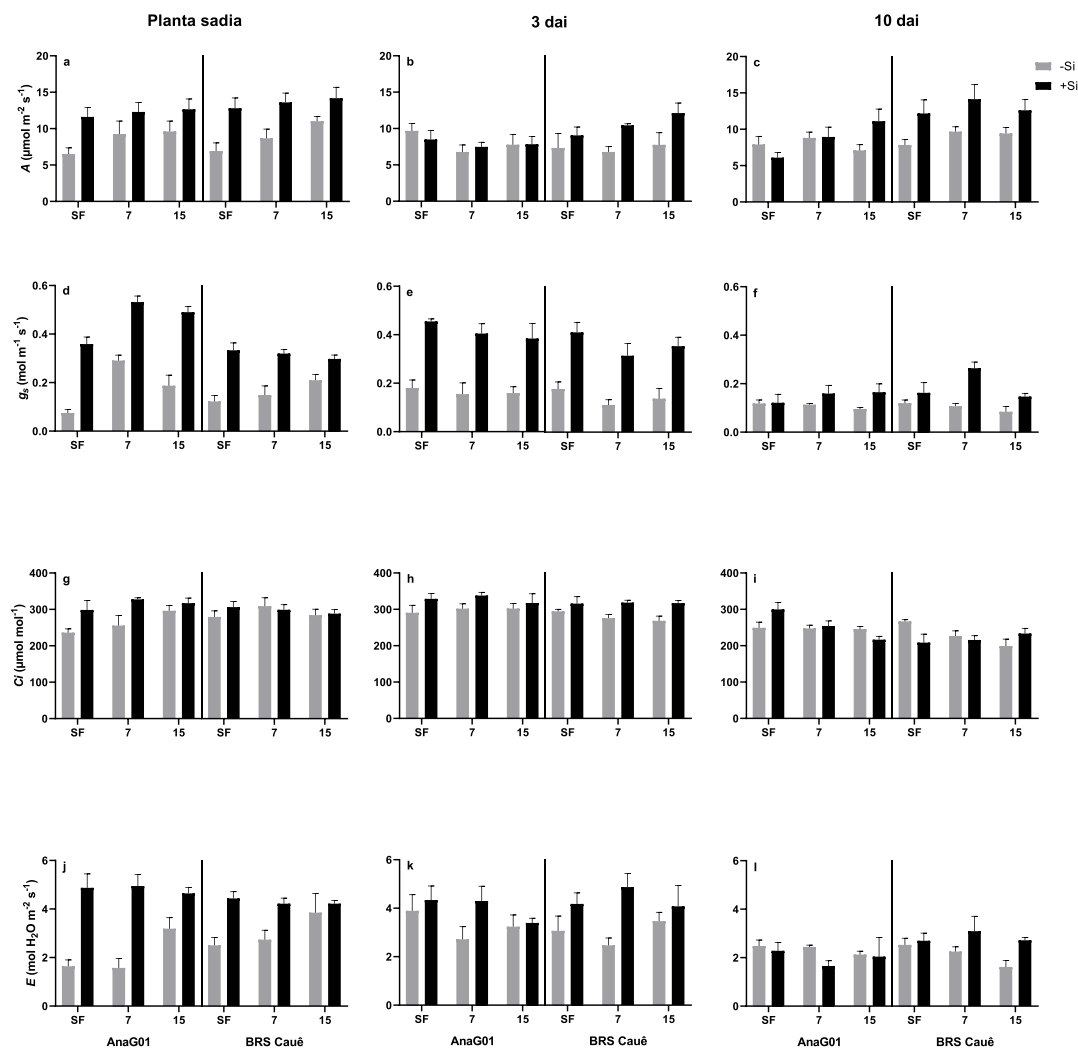
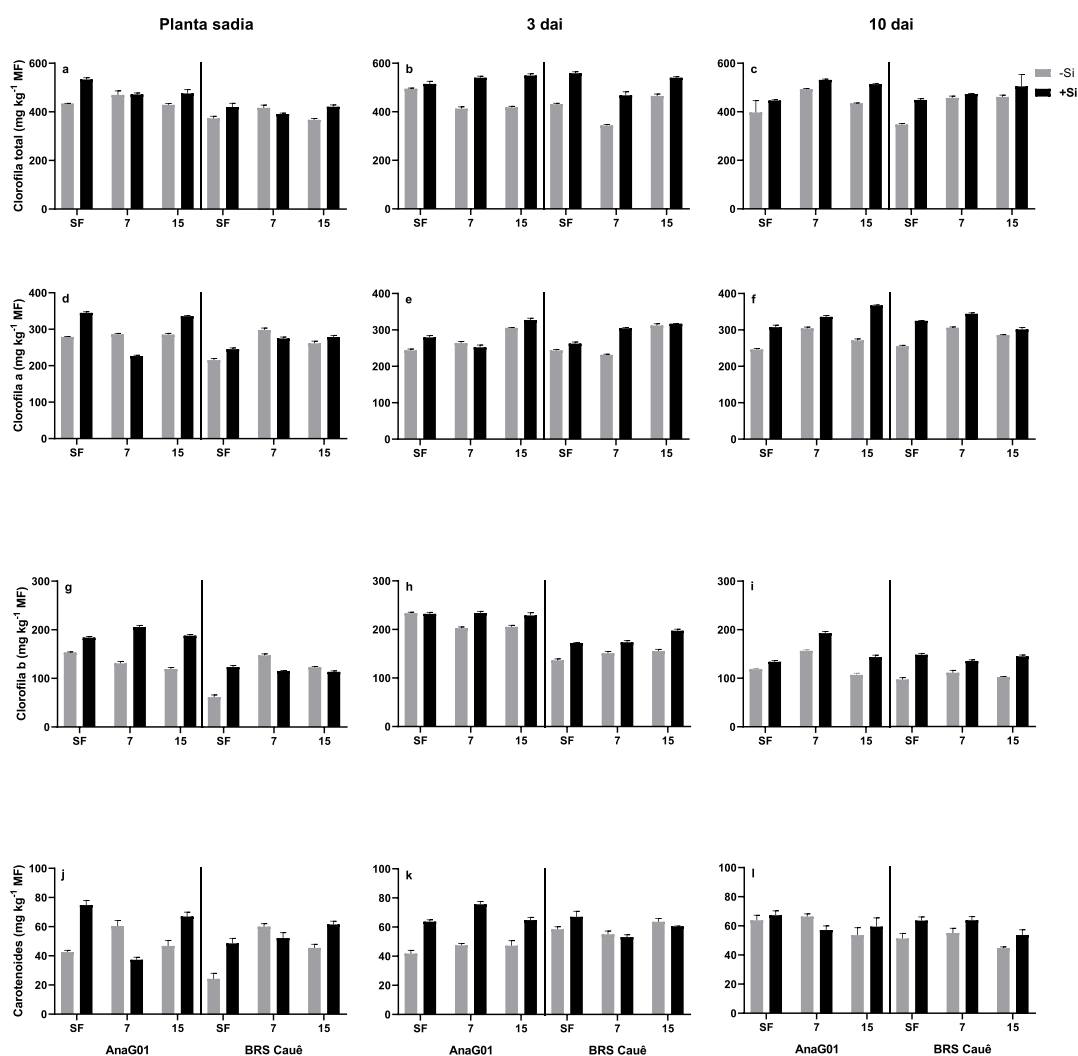


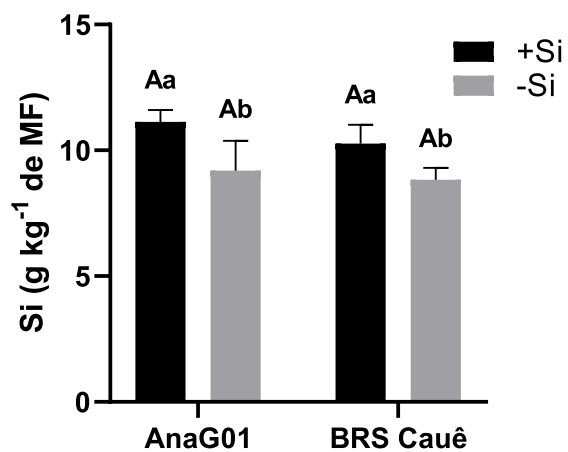
Fig. 2. Taxa fotossintética (A), condutância estomática de vapores de água (g_s), concentração interna de CO_2 (C_i) e taxa transpiratória (E) em folhas plantas saudas, ou aos 3 e 10 dias após a inoculação (dai) com *Bipolaris sorokiniana*, das cultivares AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo corrigido com calcário extrafino (-Si) ou silicato de cálcio (+Si) tratadas com fungicida preventivamente aos 7 ou 15 (7 ou 15) dias antes da inoculação ou sem fungicida (SF).

1587



1588

1589 **Fig. 3.** Concentração de clorofila total (CT), clorofila *a* (Cla), clorofila *b* (Clb) e de
 1590 carotenoides (Carot) em plantas sadias, ou aos 3 e 10 dias após a inoculação (dai) com
 1591 *Bipolaris sorokiniana*, das cultivares AnaG01 e BRS Cauê, cultivadas em solo corrigido
 1592 com calcário extrafino (-Si) ou silicato de cálcio (+Si) tratado com fungicida preventivo
 1593 aos 7 ou 15 (7 ou 15) dias antes da inoculação (DAI) ou sem fungicida (SF).



1594

1595 **Fig. 4.** Concentração foliar de silício (Si) em plantas das cultivares AnaG01 e BRS
1596 Cauê, cultivadas em solo corrigido com silicato de cálcio (+Si) ou calcário extrafino (-
1597 Si). Letras maiúsculas referem a cultivar e letras minúsculas a +Si e -Si.

4. Considerações Finais:

O fornecimento de silício para plantas de cevada cultivadas em solos com baixa disponibilidade do elemento aumenta as defesas bioquímicas e a sua resistência contra à mancha marrom.

O uso do silício altera a atividade de enzimas relacionadas ao mecanismo de defesa, como a SOD, além de promover o acúmulo de compostos fenólicos solúveis totais e a concentração de derivados do ácido lignina-tioglicólico, e a redução do extravazamento de eletrólitos.

As respostas fisiológicas e a concentração de pigmentos fotossintéticos são preservadas em plantas supridas com silício quando desafiadas por *B. sorokiniana*.

A associação de silício e a aplicação de fungicida antes da inoculação com *B. sorokiniana* confere redução na intensidade da doença.

Referências

- AGOSTINETTO, L.; CASA, R.T.; BOGO, A.; SACHS, C.; SOUZA, C.A.; REIS, E.M.; DA CUNHA, I.C. Barley spot blotch intensity, damage, and control response to foliar fungicide application in southern Brazil. **Crop Protection**. v. 67. p. 7-12. 2015.
- AGOSTINETTO, L.; CASA, R. T.; BOGO, A.; ALVES, L.; VIEIRA, J. D. A. L.; FINGSTAG, M. D.; ROSA, J. M. D. Viability of seed-borne fungi *Alternaria alternata*, *Bipolaris sorokiniana* and *Drechslera teres* in barley seeds in the south of Brazil. **Summa Phytopathologica**. v. 46. p. 26-30. 2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Abastecimento. Portaria nº 691, de 22 de novembro de 1996. Aprova a Norma de Identidade e Qualidade da Cevada, para comercialização interna. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, p. 24751, 25 nov. 1996. Seção 1.
- BOCKHAVEN, J. V.; VLEESSCHAUWER, D.; HÖFTE, M. Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: silicon leads the way. **Journal of Experimental Botany Advance**. v. 18. 2013.
- ANTONIAZZI, N.; DESCHAMPS, C. Controle de *Bipolaris sorokiniana* e rendimento de grãos em cevada após aplicação de elicitores e fungicida. **Acta Scientiarum Agronomy**. v. 29. n. 5. p. 695-700. 2007.
- CARPENTIERI-PIPOLO, V.; MINELLA, E. Cevada alimento funcional - Alternativa para a diversificação e agregação de valor na cadeia produtiva de cereais. **Embrapa Trigo-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E)**. p. 1-22. 2021.
- CAIERÃO, E.; SPEROTTO, A. L. Barley cultivar MN 698, high malting quality for the state of Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**. v.36. n.1. p. 279-281. 2006.
- CRUZ, M. F. A. et al. Microscopical aspects of the interaction bean-*Colletotrichum lindemuthianum* mediated by silicon. **Bragantia**. v. 73. n. 3. p. 284-291. 2014.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Oitavo levantamento, abril 2019 – safra 2018/2019: Brasília: **Companhia Nacional de Abastecimento**. p.139. 2019.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – grãos: Nono levantamento, abril 2020 – safra 2019/2020: Brasília: **Companhia Nacional de Abastecimento**. p.140. 2020.
- DEBONA, D.; RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual Review of Phytopathology**. v. 55, n. 4, p. 85-107, 2017.

FAO. **FAO Statistical Programme of Work 2020–2021**. Rome: FAO, 2020. DOI 10.4060/ca9734en. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca9734en/CA9734EN.pdf>. Acesso em: 3 dez. 2021.

FERRARI, J. F.; POSSAMAI, E. Incidência de *Bipolaris sorokiniana* nas sementes e transmissão para plantas de cevada. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 38. n. 3. p. 320-329. 2015.

KAUSS, H.; SEEHAUS, K.; FRANKE, R.; GILBERT, S.; DIETRICH, R.A.; KROGER, N. Silica deposition by a strongly cationic proline-rich protein from systemically resistant cucumber plants. **The Plant Journal**. v. 33. p. 87–95. 2003.

MA, J. F.; YAMAJI, N. Functions and transport of silicon in plants. **Cellular and Molecular Life Sciences**. v. 65. p. 37-40. 2008.

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/ministra-tereza-cristina-instala-camara-da-serveja>. Acesso em: 20 ago. 2020

MAPA. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/mercado-servejeiro-cresce-no-brasil-e-aumenta-interesse-pela-producao-de-lupulo-e-serveja>. Acesso em: 3 dez. 2021

MINELLA, E. Cultivo da cevada, Sistemas de produção. **Embrapa trigo**. 6ª edição. 2015.

MINELLA, E.; CIULLA, C.; OPPELT, D.; WOBETO, C.; NOVATZKI, M. Safra brasileira de cevada: resultados 2006. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA, 26., 2007, Passo Fundo. Anais... Passo Fundo: **Embrapa Trigo**. p. 102-105. 2007.

MORI, C.; MINELLA, E. Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**. 2012. 28 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 139). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do139.htm>. Acesso em: 28 mai 2019.

F. NOVAKAZI, F.; AFANASENKO, O.; LASHINA, N.; PLATZ, G. J.; SNOWDON, R.; LOSKUTOV, I.; ORDON, F. Genome-wide association studies in a barley (*Hordeum vulgare*) diversity set reveal a limited number of loci for resistance to spot blotch (*Bipolaris sorokiniana*). **Plant Breeding**. v. 139. n. 3. p. 521-535. 2020.

REIS, E. M.; CASA, R. T. Doenças da cevada: helmintosporioses (mancha em rede, mancha marrom e mancha estriada). São Paulo: **Bayer**. p. 46. 2001.

REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA DE CEVADA. Indicações técnicas para a produção de cevada cervejeira nas safras 2017 e 2018. **Embrapa Trigo**: Passo Fundo, RS. p. 114. 2017.

RODRIGUES, F. A.; DALLAGNOL, L.J.; DUARTE, H.S.S.; DATNOFF, L. E. Silicon Control of Foliar Diseases in Monocots and Dicots. Silicon and Plant Disease. London: **Elsevier**. p. 67-109. 2015.

SAKR, N. Silicon reduces *Fusarium* Head Blight Development in Barley. **The Open Agriculture Journal**. v. 15. n. 1. p. 54-65, 2021.

SHETTY, R.; JENSEN, B.; SHETTY, N. P.; HANSEN, M.; HANSEN, C. W.; STARKEY, K. R.; JØRGENSEN, H. J. L. Silicon induced resistance against powdery mildew of roses caused by *Podosphaera pannosa*. **Plant Pathology**. v. 61. n. 1. p. 120-131. 2012.

TURQUETTI, A. A. Testes in vitro de antagonismo entre *Trichoderma* sp. e *Bipolaris sorokiniana* da cevada. In: REUNIÃO ANUAL DE PESQUISA DE CEVADA. Guarapuava. Anais e ata... Passo Fundo: **Embrapa Trigo**. v. 21 p. 457-463. 2001.

WANG, M.; GAO, L.; DONG, S.; SUN, Y.; SHEN, Q.; GUO, S. Role of silicon on plant–pathogen interactions. **Frontiers in Plant Science**. v. 8. p. 701. 2017.

WIESE, J; WIESE, H.; SCHWARTZ, J.; SCHUBERT, S. Osmotic stress and silicon actadditively in enhancing pathogen resistance in barley against barley powdery mildew. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**. v. 168. p. 269–274. 2005.