



GABRIELY SERRÃO FREIRE

**SISTEMICIDADE E MECANISMOS DE DEFESA
ATIVADOS POR FUNGICIDAS NO CONTROLE DA
FERRUGEM DA SOJA**

**LAVRAS-MG
2025**

GABRIELY SERRÃO FREIRE

**SISTEMICIDADE E MECANISMOS DE DEFESA ATIVADOS POR
FUNGICIDAS NO CONTROLE DA FERRUGEM DA SOJA**

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

Prof. Dr. Edson Ampélio Pozza
Orientador

**LAVRAS-MG
2025**

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

Freire, Gabriely Serrão.

Sistemicidade e mecanismos de defesa
ativados por fungicidas no controle da ferrugem
da soja / Gabriely Serrão Freire. - 2024.
64 p. : il.

Orientador(a): Edson Ampélio Pozza.

Dissertação (mestrado acadêmico) -
Universidade Federal de Lavras, 2024.
Bibliografia.

1. Translocação. 2. Triazol. 3. Estrobilurina.
I. Pozza, Edson Ampélio. II. Título.

GABRIELY SERRÃO FREIRE

**SISTEMICIDADE E MECANISMOS DE DEFESA ATIVADOS POR
FUNGICIDAS NO CONTROLE DA FERRUGEM DA SOJA**

**SYSTEMICITY AND DEFENSE MECHANISMS ACTIVATED BY
FUNGICIDES IN SOYBEAN RUST CONTROL**

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

APROVADA em 30 de outubro de 2024.

Professor Dr. Edson Ampélio Pozza – UFLA

Professor Dr. Mario Lucio Rezende – UFLA

Dr. Helon Santos Neto – EPAMIG

Prof. Dr. Edson Ampélio Pozza
Orientador

**LAVRAS-MG
2025**

Aos meus pais, que sob muito sol, fizeram-me chegar até aqui, na sombra.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me conceder o conhecimento necessário para que esse sonho se tornasse realidade e forças para que fosse concluído;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos;

À Universidade Federal de Lavras e aos professores e técnicos do Departamento de Fitopatologia por somarem aprendizado à minha carreira profissional;

Aos meus pais Ozaíde Serrão e Manoel Adalberto Matos por apoiarem minhas escolhas, meus estudos, meus sonhos e por sempre acreditarem em mim e estarem ao meu lado, independente de tudo;

Ao meu orientador professor Dr. Edson Pozza por sempre estar disposto a orientar, pela confiança depositada em mim para a realização desse trabalho e pela amizade;

Ao Laboratório de Epidemiologia e Manejo de Doenças de Plantas, em especial, ao doutorando Felipe Leal, à pós doutoranda Yasmin Figueiredo, ao técnico Silvio Calazans e aos estagiários Ana Paula, Fernando, Maria e Nuno pelo auxílio nos experimentos, nas análises e na escrita, além do conhecimento repassado;

Ao Laboratório de Fisiologia do Parasitismo, em especial, ao professor Mario Lucio Resende, à pós doutoranda Tharyn Reichel, ao técnico Lamartine da Nobrega e à Vânia da Paixão pela disponibilidade em auxiliar nas análises bioquímicas;

Aos amigos que fiz em Lavras, em especial a Ananda Vieira, Carlos Muquessuane, técnico Edinho (*in memorian*), Egídio Aragão, Janaína Martins, Natalie Galhardo, Nathan Rodrigues, professor Dr. Ludwig Pfenning, Rafael Coelho, Vitória Cambuí e demais colegas de departamento, por risadas, ensinamentos e encorajamento nos momentos difíceis;

Obrigada a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor mundial de soja, Apesar da alta produção, essa fabácea sofre com perdas de até 90% devido a Ferrugem Asiática da Soja (FAS). Dentre as formas de manejo da FAS destaca-se o controle químico com o uso da mistura de moléculas de triazóis com estrobilurinas, chamadas “Strobimix”, porém, é necessário conhecer os mecanismos de sua sistemicidade. Sendo assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a translocação de triazóis e estrobilurinas via raiz, sua sistemicidade nos terços superior e inferior de folíolos, pulverizados somente na região central e quantificar os níveis da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL), compostos fenólicos solúveis totais e lignina solúvel de plantas de soja inoculadas com ferrugem antes e após a aplicação desses fungicidas. Em todos os ensaios foram utilizadas sementes de soja da cultivar Olimpo IPRO® e avaliados um princípio ativo do grupo dos triazóis e estrobilurinas. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, composto por seis tratamentos e quatro repetições. No ensaio (I), foi utilizada a solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950) com duas plantas em cada vaso. Foram empregadas 4 doses dos fungicidas, quais sejam 15, 25, 50 e 100% da dose de bula, sendo 100% a dose de bula do ingrediente ativo (ia) A cada três dias foram feitas avaliações de severidade em todos os trifólios, com a escala diagramática de Franceschi *et al.* (2020), totalizando dez avaliações. Os valores de severidade foram integralizados em Área Abaixo da Curva de Progresso da Doença (AACPD), segundo a equação proposta por Shaner & Finney (1977). A eficiência de controle foi calculada com a equação de Abbott (1925). Ao final do experimento foi obtido o peso da parte aérea (PPAS) e das raízes secas (PRS) de todas as plantas. No segundo ensaio, a aplicação dos fungicidas foi realizada na face adaxial das folhas do terço médio do folíolo central do 3º trifólio, no estágio V4, sem possibilidade de escorrimento, para averiguar a sistemicidade para os terços superior (acropetal) e inferior (basipetal). Após os primeiros sinais do patógeno, foram feitas avaliações de severidade no trifólio central a cada três dias, com a escala diagramática usada no ensaio anterior, totalizando seis avaliações. Os folíolos centrais foram coletados e escaneados no software ImageJ® v. 1.54g; (III). No terceiro ensaio, foram utilizadas cinco plantas para coleta em cinco tempos para análise bioquímica. Os fungicidas foram aplicados no estágio fenológico V4, em toda a planta, em ambas as superfícies da folha, com os mesmos IA's e as mesmas doses do ensaio II. Em todos os ensaios, as plantas foram inoculadas com suspensão de $1,0 \times 10^5$ urediniosporos de *Phakopsora pachyrhizi*/mL em água + tween 20 a 0,05% sete dias após a aplicação dos produtos. As análises estatísticas foram realizadas no software R Studio em teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). No ensaio I, a menor fitotoxidez foi observada para as estrobilurinas, na menor dose, ou seja, a de 15% da dose de campo. Sendo assim, o patógeno foi inoculado cinco dias após os IA's serem adicionados em solução nutritiva. Nessa dose, todos os fungicidas apresentaram sistemicidade a partir das raízes e reduziram a severidade da doença ($p < 0,05$). No ensaio II, quando avaliada a translocação por meio da redução da intensidade da doença, observou-se eficiência de controle em todos os tratamentos. As estrobilurinas apresentaram sistemicidade nas duas direções, tanto acropetal quanto basipetal, porém o triazol também obteve essa eficiência. Antes de translocar via xilema, esse produto também transloca via mesostêmica, possibilitando o controle também de forma basipetal. No ensaio III, houve picos das atividades da enzima PAL às 72 horas após a inoculação e alteração às 96h. Para a lignina solúvel houve alteração apenas às 72 horas e 96h após a inoculação.

Palavras-chave: Translocação; triazol; estrobilurina; soja; ferrugem; fisiologia da resistência.

ABSTRACT

Brazil is the world's largest producer of soybeans. Despite its high production, this legume faces losses of up to 90% due to Asian Soybean Rust (ASR). Among the management strategies for ASR, chemical control with a mixture of triazole and strobilurin molecules, known as "Strobimix," stands out. However, it is necessary to understand the mechanisms of their systemicity. Thus, the objective of this study was to evaluate the translocation of triazoles and strobilurins via the root, their systemicity in the upper and lower thirds of leaflets, sprayed only in the central region, and quantify the levels of the enzyme phenylalanine ammonia-lyase (PAL), total soluble phenolic compounds, and soluble lignin in soybean plants inoculated with rust before and after the application of these fungicides. In all experiments, seeds from the soybean cultivar Olimpo IPRO® were used, and an active ingredient from the triazole and strobilurin groups was evaluated. The experimental design was a randomized block, consisting of six treatments and four replications. In experiment (I), Hoagland and Arnon's (1950) nutrient solution was used with two plants per pot. Four doses of fungicides were applied: 15, 25, 50, and 100% of the label dose, with 100% corresponding to the recommended dose of the active ingredient (a.i.). Every three days, disease severity was evaluated in all trifoliates using the diagrammatic scale of Franceschi et al. (2020), totaling ten evaluations. Severity values were integrated into the Area Under the Disease Progress Curve (AUDPC), according to the equation proposed by Shaner & Finney (1977). Control efficiency was calculated using Abbott's equation (1925). At the end of the experiment, the shoot dry weight (SDW) and root dry weight (RDW) of all plants were measured. In the second experiment, the fungicides were applied to the adaxial surface of the central leaflet of the third trifoliolate, at the V4 stage, ensuring no runoff, to investigate systemicity towards the upper (acropetal) and lower (basipetal) thirds. After the first signs of the pathogen, disease severity was evaluated in the central trifoliolate every three days, using the same diagrammatic scale as in the previous experiment, totaling six evaluations. The central leaflets were collected and scanned using ImageJ® software v. 1.54g. In the third experiment, five plants were used for collection at five time points for biochemical analysis. Fungicides were applied at the V4 phenological stage on the entire plant, on both leaf surfaces, with the same a.i.s and doses as in experiment II. In all experiments, plants were inoculated with a suspension of 1.0×10^5 urediniospores of *Phakopsora pachyrhizi*/mL in water + 0.05% Tween 20 seven days after the product application. Statistical analyses were performed using R Studio with the Scott-Knott test ($p < 0.05$). In experiment I, the lowest phytotoxicity was observed for strobilurins at the lowest dose, i.e., 15% of the field dose. Thus, the pathogen was inoculated five days after the a.i.s were added to the nutrient solution. At this dose, all fungicides showed systemicity from the roots and reduced disease severity ($p < 0.05$). In experiment II, when evaluating translocation by disease intensity reduction, control efficiency was observed in all treatments. Strobilurins showed systemicity in both directions, acropetal and basipetal, but triazole also achieved this efficiency. Before translocating via xylem, this product also translocates via the mesostemic pathway, allowing basipetal control. In experiment III, peaks of PAL enzyme activity occurred at 72 and 96 hours after inoculation. For soluble lignin, changes were observed only at 72 and 96 hours after inoculation.

Keywords: Translocation; triazole; strobilurin; soybean; rust; resistance physiology.

INDICADORES DE IMPACTO

O trabalho teve por objetivo avaliar a sistemicidade e a capacidade de influenciar na formação de barreiras de resistência de duas diferentes estrobilurinas e do tebuconazol, aplicados preventivamente, visando o controle eficiente da ferrugem asiática da soja. Comprovou-se a eficácia da translocação e com baixos sintomas de fitotoxidez, a alta sistemicidade do triazol a partir de determinado ponto de deposição, aumento nos teores de lignina às 72 horas após a inoculação do patógeno e aumento da camada de cera. Tais resultados alinham-se na área temática de tecnologia a produção e com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável da ONU da indústria, inovação e infraestrutura, pois foram observados possíveis formas da utilização racional e eficiente de pesticidas.

IMPACT INDICATORS

The objective of this study was evaluate the systemicity and the ability to influence the formation of resistance barriers of two different strobilurins and tebuconazole, applied preventively, aiming at the efficient control of Asian Soybean Rust. The effectiveness of translocation was proven, with low symptoms of phytotoxicity, high systemicity of the triazole from a certain point of deposition, increase in lignin levels 72 hours after inoculation of the pathogen and increase in the wax layer. These results are in line with the thematic area of technology and production and with the UN Sustainable Development Goal of industry, innovation and infrastructure, as possible ways of rational and efficient use of pesticides were observed.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2. REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 SOJA: ORIGEM E IMPORTÂNCIA	4
2.2 FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA	4
2.3 MANEJO DA FAS	6
2.4 CONTROLE QUÍMICO DA FAS	6
2.4.1 ESTROBILURINA	7
2.4.2 TRIAZÓIS	9
2.4.3 SISTEMICIDADE DE FUNGICIDAS	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE	16
3.2 OBTENÇÃO DE INÓCULO E INOCULAÇÃO	16
3.3 EFICÁCIA	16
3.4 ENSAIO I – SOLUÇÃO NUTRITIVA	17
3.4.1 SOLUÇÃO NUTRITIVA E PRODUÇÃO DAS PLANTAS DE SOJA....	17
3.4.2 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA SEVERIDADE DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA E EFICÁCIA	18
3.4.3 METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA SEVERIDADE DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA	18
3.4.4 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO PESO DA PARTE AÉREA SECA E PESO DA RAIZ SECA	19
3.5 ENSAIO II – TRANSLOCAÇÃO FOLIAR DE FUNGICIDAS DOS GRUPOS QUÍMICOS DAS ESTROBILURINAS E DOS TRIAZÓIS	19
3.5.1 MÉTODO DE AVALIAÇÃO DA SEVERIDADE DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NOS TERÇOS SUPERIOR, MÉDIO E INFERIOR DO FOLÍOLO CENTRAL E EFICÁCIA	20
3.6 ENSAIO III - ANÁLISE DOS COMPOSTOS ASSOCIADOS A RESISTÊNCIA	20
3.6.1 MÉTODO DE COLETA PARA ANÁLISE DA ENZIMA PAL E FENOL- LIGININA	21
3.6.2 AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS	22
3.6.3 AVALIAÇÃO DE CLOROFILA	22
3.6.4 DETERMINAÇÃO DE PESO DE PLANTA SECA	23
3.6.5 AVALIAÇÃO DA CAMADA DE CERA	23

3.7	ANÁLISE ESTATÍSTICA	23
4.	RESULTADOS.....	24
4.1	MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE	24
4.2	ENSAIO I	24
4.2.1	ÁREA ABAIXO DA CURVA DE PROGRESSO DA DOENÇA.....	25
4.2.2	PESO DE PARTE AÉREA SECA (PPAS) E DAS RAÍZES SECAS (PRS) DE PLANTAS DE SOJA	26
4.3	ENSAIO II.....	28
4.3.1	SEVERIDADE DA FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA NOS TERÇOS SUPERIOR, MÉDIO E INFERIOR DO FOLÍOLO CENTRAL.....	28
4.3.2	SINTOMAS DE FITOTOXIDEX EM PLANTAS DE SOJA	29
4.4	ENSAIO III	29
4.4.1	AVALIAÇÃO DA ENZIMA PAL, FENÓIS TOTAIS E LIGNINA	29
4.3.2	AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS MORFOLÓGICAS	32
4.4.3	AVALIAÇÃO DO TEOR DE CLOROFILA	33
4.4.4	AVALIAÇÃO DO PESO DA PLANTA SECA	33
4.4.5	AVALIAÇÃO DA CAMADA DE CERA.....	33
5.	DISCUSSÃO	34
6.	CONCLUSÕES	38
7.	REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A soja é uma das ‘commodities’ mais comercializadas no mundo. No total, são mais de 369 milhões de toneladas produzidas, sendo o Brasil o maior produtor mundial, responsável por mais de 154 milhões de toneladas produzidas e produtividade média de 3.773 kg/ha (CONAB, 2024; USDA, 2023). Dentre seus usos, a soja é utilizada como óleo, farinha, leite e carne texturizada para alimentação humana, lubrificantes industriais, farelo na ração animal, biodiesel como combustível sustentável, entre outros subprodutos (BOSCHIERO, 2023).

Apesar dos números, diversas doenças podem ocorrer nessa oleaginosa, sendo a principal delas a Ferrugem Asiática da Soja (FAS), causada por *Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P.Sydow. Essa doença é capaz de causar perdas de até 90% na produção quando não controlada (SILVA *et al.*, 2020), dependendo da suscetibilidade da variedade de soja, época da estação de cultivo, condições climáticas durante o progresso da doença, fertilidade do solo e nutrição da planta (SWEETS; WRATHER; WRIGHT, 2015; POZZA; POZZA, 2023).

Diversas são as formas de manejo da FAS. Entre as principais medidas de controle estão o plantio de cultivares resistentes, pois, apesar de não imunes, são menos sujeitas a queda de produtividade, a semeadura no início da época recomendada, se possível de cultivar precoce, em razão do escape à época favorável ao início da epidemia da ferrugem em plantas jovens, a eliminação de plantas daninhas as quais podem ser fonte de inóculo de inicial e o vazio sanitário, de no mínimo 60 dias, durante a entressafra para reduzir a quantidade de esporos do fungo (GODOY *et al.*, 2017; MATSUO; LOPES; SEDIYAMA, 2022). Ademais, a rotação de culturas, a eliminação de compactação do solo, a utilização de sementes saudáveis e a adubação equilibrada, baseada em análises de solo, não devem ser descartados (GODOY, 2017; POZZA; POZZA, 2023).

Embora seja utilizado esse manejo integrado, a maioria dos cultivares são suscetíveis, principalmente porque a população desse patógeno possui alta variabilidade e indivíduos aptos a infecção e a colonização da cultura em diferentes condições edafoclimáticas, sendo capaz de causar epidemias com elevadas taxas de progresso. Sendo assim, o controle químico é utilizado no controle da doença nesses diferentes cenários. Entre eles destacam-se os fungicidas dos grupos químicos dos triazóis, e seu

derivado as triazolinionas, as estrobilurinas e as carboxamidas, todos com modo de ação específico e os multissítios ditiocarbamatos, isofitalonitrila e os cúpricos (FRAC, 2023).

A estrobilurina possui translocação mesostêmica e translaminar, ou seja, por entre e dentro das células, porém, raramente, sem atingir a dose letal quando é transportada via xilema. Em relação ao modo de ação, inibe a respiração mitocondrial dos fungos por meio do bloqueio de transferência de elétrons do citocromo b para o c1 e, por conseguinte, interrompe a síntese de ATP (BALARDIN, 2021). Por outro lado, o triazol é sistêmico, com translocação acropetal, de dose letal, via xilema. Atua inibindo a síntese do ergosterol, um componente funcional na manutenção da integridade da membrana plasmática dos fungos (JULIATTI; JULIATTI; FIGUEIRÓ, 2015).

Entretanto, nas últimas décadas, o uso constante de fungicidas sistêmicos com sítio de ação específico, selecionou populações resistentes ao ingrediente ativo, vindo a gerar relatos de resistência e perda de eficiência em casos de uso inadequado (CERESINI *et al.*, 2024). Nesse sentido, uma das primeiras moléculas do grupo químico dos triazóis a ser empregado no controle da FAS, foi o tebuconazol. Segundo estudos e acompanhamento do Consórcio de Pesquisa da Ferrugem Asiática da Soja (EMBRAPA 2024), a eficiência desse princípio ativo teve queda drástica nos anos subsequentes, porém atualmente, sua eficiência teve significativo aumento, provavelmente devido a não pulverização e exposição no campo. Dentro das estrobilurinas, a resistência é específica para a molécula, com raros relatos de resistência cruzada (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Além do mais, as misturas de triazóis com estrobilurinas, chamadas “Strobimix”, são amplamente empregados no controle da FAS na tentativa de mitigar a seleção de populações resistentes. Porém, apesar dessas duas moléculas químicas serem utilizadas em larga escala, poucos estudos foram realizados sobre as suas mesosistemicidade e sistemicidade ou deslocamento entre as células e vasos nas folhas da soja, tanto quanto para moléculas já existentes quanto para novas moléculas. No caso da estrobilurina, a velocidade da absorção e da mesosistemicidade e sistemicidade via xilema, o sentido do deslocamento dentro da folha, além de outras características, podem impactar diretamente na eficiência do controle de doenças, entre elas, a ferrugem asiática da soja (GOTARDI, 2022). Essa translocação depende de características da molécula, do seu grupo químico, da sua formulação, mais precisamente da presença de adjuvantes na aplicação, da mistura de tanque no campo, tensão superficial dos produtos, do equipamento de pulverização,

das condições ambientais durante a aplicação, da morfologia e da fisiologia do hospedeiro, por exemplo, inclinação de folhas, espessura e composição da camada de cera e da parede celular, abertura e fechamento de estômatos, influenciando diretamente o potencial osmótico e a difusão intra e inter celular (WANG; LIU, 2007; COLPO, 2022). Ou seja, a dose efetivamente ativa ou capaz de entrar em contato com o micélio do patógeno, em fase de colonização, será reduzida perante aquela recomendada na bula.

Em relação as barreiras de resistência, a sistemicidade e outros mecanismos de ação associados aos fungicidas, estão relacionadas a capacidade das plantas de induzirem resistência por meio de mecanismos especializados de defesa a patógenos. Essa resistência, também chamada de resistência horizontal, pode ser aumentada por alterações anatômicas, bioquímicas e fisiológicas e restrição da transferência de nutrientes aos patógenos, impedindo seu crescimento e desenvolvimento (POZZA; POZZA, 2012; POZZA; POZZA, 2023). Plantas superiores desenvolveram barreiras estruturais e bioquímicas pré-formadas (constitutivas) e pós formadas, ou seja, após a infecção do patógeno. Entre as barreiras estruturais destacam-se a camada de cera e a parede celular. Nessa última tanto a celulose quanto a lignina são fundamentais na sua constituição. A lignina é um polímero aromático da parede celular vegetal e além de fornecer barreira física à entrada de fitopatógenos nos tecidos vegetais, proporciona a inibição da elongação do tubo germinativo e impede a propagação de toxinas e de enzimas hidrolíticas, vindo a evitar transferência de água e nutrientes entre planta-hospedeiro, além (BIZUNEH, 2021; POZZA, POZZA, 2023). Porém, é necessário tempo, para ocorrer sua síntese e sua ligação com polímeros de celulose na parede celular. Portanto, a presença de lignina em análises bioquímicas das folhas da planta pode demonstrar a resposta de resistência do hospedeiro diante ao ataque de fitopatógenos. Algumas moléculas são capazes de induzir a formação dessas barreiras, por elicitar a formação desses compostos ligados a resistência. Tal fato já foi constatado com moléculas de triazóis reguladores de crescimento na cultura do milho (AHMAD *et al.*, 2018) e maracujá (TEIXEIRA *et al.*, 2019) e nas moléculas de estrobilurina e carboxamida nas culturas do tomate (MAREK, 2018) e milho (FREITAS E SILVA *et al.*, 2018).

A utilização de fungicidas facilmente absorvidos e móveis, devido a suas diferentes formas de sistemicidade, está sendo cada vez mais relevante para os produtores de soja. Sendo assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a sistemicidade e a capacidade de influenciar na formação de barreiras de resistência de duas diferentes estrobilurinas e

do tebuconazol, aplicados preventivamente, visando o controle eficiente da ferrugem asiática da soja.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1 Soja: origem e importância

Pertencente à família das Fabaceae, a soja cultivada (*Glycine max* [L.] Merrill) é originária do nordeste da China e se expandiu para o Ocidente no final do século XV e início do século XVI. Chegou ao Brasil no ano de 1882, sendo principalmente cultivada no Sudeste como planta hortícola. Apenas em 1935, iniciou-se a produção de grãos em escala comercial no país (BEZERRA *et al.*, 2022). A produção mundial, da safra plantada em 2023 e colhida em 2024 foi de 369,029 milhões de toneladas, sendo o Brasil o líder do ranking com cerca de 154 milhões de toneladas produzidas em pouco mais de 44 milhões de hectares. O estado do Mato Grosso é o maior produtor nacional, com 45.600,5 milhões de toneladas produzidas, seguido do Paraná, Rio Grande do Sul e Goiás (CONAB, 2024; USDA, 2023).

Por possuir produção de baixo custo relativo, a soja é, atualmente, a principal complementação alimentar de países em desenvolvimento. Seus grãos são ricos em proteínas e óleo vegetal, tornando-a matéria prima para produzir adubo verde e forragens na alimentação animal, óleo para a alimentação humana e para a produção de biodiesel, desinfetante, lubrificante, além do farelo poder ser utilizado na alimentação humana e animal. Ademais, tem expressão em diversos setores socioeconômicos do país, sendo essa oleaginosa vital na geração de riquezas, empregos e divisas (APROSOJA, 2023; CARVALHO *et al.*, 2023).

Apesar das altas produtividades, a cultura da soja pode ser infectada por diversos fitopatógenos. No Brasil, já foram relatadas 47 doenças, sendo 33 causadas por fungos, seis por nematoides, quatro por vírus e quatro por bactérias. A principal doença, responsável por grandes perdas, é a Ferrugem Asiática da Soja - FAS (*Phakopsora pachyrhizi*), fungo biotrófico, dependente do hospedeiro vivo para sobreviver ou de plantas alternativas e/ou secundárias (MATSUO; LOPES; SEDIYAMA, 2022).

1.2 Ferrugem asiática da soja

Apesar de ter sido registrada a primeira vez em 1902, no Japão, como *Uredo sojae* Henn., apenas em 1914, na China, a FAS foi descrita em seu atual nome, *Phakopsora*

pachyrhizi e, posteriormente, seguiu sendo detectada ao longo do continente asiático e africano (GOELLNER *et al.*, 2010). Em 1979, Deslandes descreveu a presença da ferrugem asiática no Brasil, nos campos experimentais de soja, na cidade de Lavras (MG). Na safra 1990/91, foram registradas epidemias em Minas Gerais e no Distrito Federal, vindo a indicar o potencial destrutivo da doença (JULIATTI, 2018). Entretanto, apenas na safra 2001/2002, houve a primeira grande epidemia da FAS no Brasil, inicialmente no estado do Paraná, porém rapidamente se espalhou para os demais estados produtores devido a sua fácil dispersão via aérea, com perdas de mais de 569,2 mil toneladas. Na safra 2002/03 a ferrugem atingiu mais de 90% da área de produção do Brasil, com mais 3,3 milhões de toneladas de perda e em 2003/2004, 4,6 milhões de toneladas (YORINORI; JUNIOR; LAZAROTTO, 2004). Segundo o Consórcio Antiferrugem (2023), os custos para controlar a doença no Brasil, ultrapassam US\$ 2 bilhões por safra, quando se considera os gastos com fungicidas e as perdas na produtividade.

Dentre as maiores dificuldades no monitoramento, manejo e controle da FAS, está em reconhecer dos sintomas iniciais. Esses são facilmente confundidos com outras doenças de final de ciclo, como cercosporiose e septoriose e ainda deficiências de micronutrientes e injúrias por fitotoxidez de herbicidas, indutores de resistência, calda de pulverização com pH alterado ou alta condutividade elétrica, além de intempéries climáticas (MATSUO; LOPES; SEDIYAMA, 2022). De modo geral, os sintomas da ferrugem podem ser observados em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, mas principalmente com o fechamento do dossel na fase da floração (R+1), vindo a comprometer a formação e enchimento das vagens e peso final dos grãos. A epidemia se inicia com a produção de esporos (urediniósporos), a qual pode durar ao menos três semanas. Os urediniósporos são levados via aérea, depositados nas folhas e penetram, tanto por meio dos estômatos, quanto diretamente, por meio da epiderme foliar, vindo a produzir pequenas lesões (urédia) e urediniósporos entre sete e 14 dias, de acordo com condições ambientais (ZAMBOLIN *et al.*, 2021).

A partir disso, as urédias variam de acordo com a idade e relação cultivar-patógeno. Essas lesões variam de cor castanho-claro (tipo TAN, com escassas áreas necróticas, as quais representam sensibilidade) a castanho-avermelhado (tipo RB, abundantes áreas necróticas, com maior resistência) na face abaxial dos folíolos do terço inferior, vindo a aparecer na face adaxial conforme a doença evolui. Por conta das lesões, a área foliar é reduzida, diminuindo a capacidade fotossintética, vindo a causar

amarelecimento e queda de folhas. Os urediniósporos não germinam na ausência do orvalho e o processo de infecção e estabelecimento do patógeno requerem temperaturas entre 15°C a 22°, com umidade relativa de 75% a 80% e 6-12h de molhamento foliar por dia (SEIXAS *et al.*, 2020; MATSUO; LOPES; SEDIYAMA, 2022).

1.3 Manejo da FAS

Diversas são as formas de manejo da FAS. Dentre os métodos integrados de controle estão os culturais, com a eliminação de plantas daninhas (tigueras), e por conseguinte, o vazio sanitário de no mínimo 60 dias, instaurado via Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) desde 2006, o qual visa a redução do inóculo inicial ou população de ferrugem da soja. Ademais, há também o controle genético com o uso de cultivares resistentes, pois são menos sujeitas a queda de produtividade. Porém, a existência de muitas raças (patótipos) dificulta o controle por meio da resistência. A semeadura no início da época recomendada, se possível de cultivar precoce, em razão de retardar o aparecimento da ferrugem em plantas jovens, rotação de culturas, eliminação de compactação do solo, utilização de sementes saudáveis, arranjo populacional adequado e adubação baseada em análises de solo não devem ser descartados (GODOY *et al.*, 2017; MATSUO; LOPES; SEDIYAMA, 2022; MAPA, 2024).

1.4 Controle químico da FAS

Depois de iniciada a epidemia, a *P. pachyrhizi* é disseminada rapidamente por toda a área cultivada, devido à alta reprodução e fácil disseminação de seus urediniósporos. Devido a elevada demanda por grãos de soja na agropecuária nacional, é essencial o monitoramento e detecção da doença no seu estágio inicial, além de práticas de manejo rápidas, a partir do uso de fungicidas, a fim de obter controle eficiente (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2014; SEIXAS *et al.*, 2018).

Os fungicidas podem ter modo de ação específico como triazóis, triazolinona, carboxamidas e estrobilurinas, os quais vão de encontro a um único ponto da via metabólica, enzima ou proteína necessária para o crescimento e o desenvolvimento do patógeno, ou multissítios, e estes atuam em diversos pontos do metabolismo do fungo (GODOY *et al.*, 2017). A recomendação do FRAC (Fungicide Resistance Action Committee) (2023) é a aplicação combinada ou alternada com fungicidas multissítios e de sítio específico, visando recuperar a baixa eficácia dos produtos os quais já apresentam

redução da sensibilidade e preservar o tempo de eficiência dos princípios ativos utilizados (ALVES; JULIATTI, 2018).

1.4.1 Estrobilurina

Inicialmente extraída do basidiomiceto *Strobilurus tenacellus*, tendo como fungicida natural o ácido β -methoxyacrilato, a estrobilurina é classificada no grupo C, subgrupo C3 – Complexo III, e é um importante grupo no controle químico de fungos na agricultura (FRAC, 2024; BARTLETT *et al.*, 2002). De maneira sucinta, no Complexo I da cadeia transportadora de elétrons, a coenzima ubiquinona (UQ) recebe um par de elétrons e os leva até o Complexo III, local o qual há a transferência destes elétrons do citocromo b para o c1 por meio do sítio de ligação óxido redutase de ubiquinona do citocromo c. Estes elétrons são aceitados por moléculas de oxigênio, as quais atraem prótons e formam água e o fluxo desses prótons resulta na síntese de ATP. As estrobilurinas agem nesse sítio de ligação, vindo a causar inibição da respiração mitocondrial e por conseguinte, da formação de ATP, energia vital para os fungos crescerem. Portanto, as estrobilurinas também são conhecidas como Inibidoras da Quinona (QOI's) Externa da Mitocôndria (IQe) e são consideradas altamente específicas, por possuírem apenas um alvo ou sítio de ação no patógeno (BAIBAKOVA *et al.*, 2019; REIS; REIS; CARMONA, 2019).

No Brasil, cinco moléculas deste grupo são registradas para controlar a ferrugem asiática da soja, a trifloxistrobina, a azoxistrobina, a picoxistrobina, a piraclostrobina e a metominostrobina (AGROFIT, 2024). Por possuírem modo de ação na interrupção de ATP, são eficazes em diferentes fases do crescimento e do desenvolvimento do fungo, como a germinação de esporos, crescimento dos tubos germinativo e de penetração e ainda no micélio de colonização. Em todas essas fases é necessário alto dispêndio de energia, (BARBOSA JUNIOR, 2020). Apesar de terem alto nível de fungitoxicidade contra os Ascomicetos, Basidiomicetos e Oomicetos, esse espectro de atividade pode variar entre essas moléculas, pois nem todas controlam todos os fungos da mesma forma, devido as diferenças bioquímicas (BARTLETT *et al.*, 2002).

Além de ser fungicida, a estrobilurina possui benefícios na fisiologia das plantas. Essa molécula química auxilia na redução da respiração e aumento da fotossíntese líquida, por conta da alteração no ponto de compensação de CO₂, onde há o aumento da assimilação de CO₂ (REIS; REIS; CARMONA, 2019). Fagan *et al.* (2010), observaram

aumento na fotossíntese líquida, em plantas de soja tratadas com piraclostrobina, 3h após a aplicação, além de diminuição da respiração em 76%, em relação ao controle, um dia depois de aplicada. Ademais, há o aumento da atividade da enzima NADH-nitrato redutase, a qual propicia a catalisação de nitrato, aumento da assimilação de nitrogênio (N) na planta e por consequência, promoção de maior biomassa vegetal e incremento de produtividade (AMARO, 2020). Essa análise foi realizada por Soares *et al.* (2011), aonde a piraclostrobina proporcionou incremento na produtividade de 1.184,6 e 615,9 kg ha⁻¹ em relação a azoxistrobina e a testemunha, respectivamente. Além disso, a influência nos hormônios vegetais, com a redução da produção de etileno e, por conseguinte, degradação de citocininas, retardo na degradação da clorofila e minimização do processo de senescência, causou aumento da duração da área foliar verde (“efeito verde”) (FAGAN; CASAROLI, 2014) e menor degradação da clorofila, a qual contribuiu para aumentar a taxa líquida de assimilação de CO₂, pois esta molécula é responsável por absorver a energia luminosa e canalizá-la para os fotossistemas, desse modo, há aumento da atividade fotossintética das folhas (AMARO, 2020).

Devido as estrobilurinas atuarem em locais específicos dos patógenos, elas são suscetíveis à resistência (FENG *et al.*, 2020). De acordo com o FRAC (2006), três mutações associadas à resistência ao IQe já foram detectadas no gene do citocromo b (CYTB, em inglês): mudança de glicina para alanina na posição 143 (G143A), mudança de fenilalanina para leucina na posição 129 (F129L) e mudança de glicina para arginina na posição 137 (G137R). Porém, apenas na safra da soja de 2013/2014 houve o relato de mutação do F129L no gene CYTB, sendo não só a primeira em *P. pachyrhizi*, mas no patossistema das ferrugens no geral (KLOSOWSKI *et al.*, 2015). Em 2023, em comunicado sobre novas recomendações de manejo de doenças em soja, o FRAC ratificou, apesar da mutação no G143A, de alta resistência e de se encontrar presente em outras doenças (como a mancha alvo e cercosporiose), esta não foi identificada para ferrugem asiática da soja, assim como a mutação no G137R. A resistência cruzada entre estrobilurinas metoxiacrilatos, oximinoacetatos e não estrobilurinas com mecanismo de ação semelhante (oxazolidinedionas) também podem ocorrer, sendo já registrada em algumas doenças (BAIBAKOVA *et al.*, 2019).

1.4.2 Triazóis

Introduzidos no mercado nos anos 70, os triazóis – ou Inibidores da Desmetilação (IDM ou DMI) – pertencem a Classe I de fungicidas e agem inibindo a rota bioquímica da síntese de ergosterol, o principal esterol dos fungos, por isso também são chamados de Inibidores da Biossíntese de Esteróis (IBE) (FRAC, 2024). O ergosterol é um componente funcional na manutenção da integridade da membrana plasmática fúngica, encontrado em maiores níveis nas camadas fosfolipídicas. Durante sua biossíntese há a produção de 24-metilenohidrolanosterol (lanosterol), substrato da enzima C14 α -desmetilase (CYP51). Ou seja, o lanosterol é demetilado, perde um radical metil, devido a ação ou retirada por meio da enzima CYP51, para então dar origem ao ergosterol. Quando moléculas do fungicida do grupo químico do triazol entram em contato com o patógeno, ocupam os sítios da enzima C14 α -desmetilase, ligando-a ao citocromo P450, proteína responsável por catalisar a oxidação do C14 α -metil a C14 α -hidroximetil, inibindo a demetilação do lanosterol e a síntese desse em ergosterol. Dessa maneira, a biossíntese de ergosterol não se completa e acumula-se esteróis como 4,4-dimetil e 4 α -metil, os quais possuem radicais 14 α -metil, além da presença dos compostos intermediários, como álcoois e aldeídos, os quais auxiliariam na finalização da síntese de ergosterol. Sendo assim, há a perda de estrutura e ruptura da membrana plasmática, além de alteração da difusão e transporte celular, por conta da modificação na sua permeabilidade, vindo a ocorrer a perda de seus elementos intracelulares, além da inibição da biossíntese dos triglicerídeos e fosfolipídios do fungo, vindo a resultar na necrose celular, levando-o a morte (JULIATTI; JULIATTI; FIGUEIRÓ, 2015; SILVA, 2019; MARQUES, 2022).

Os DMI não inibem a germinação de esporos, pois estas estruturas possuem esteróis armazenados e podem germinar na ausência da sua biossíntese. Porém, os triazóis atuam como curativos por apresentarem elevada fungitoxicidade no micélio, rápida penetração, translocação e alto poder residual e baixa lixiviação, inibindo o crescimento micelial e o desenvolvimento de haustórios (RODRIGUES; VIERO, 2014; REIS; REIS; CARMONA, 2019). Para o Brasil, são registrados seis ingredientes ativos registrados para o controle da FAS: ciproconazol, epoxiconazol, fluquinconazol, mefentrifluconazol, tebuconazol e tetraconazol (AGROFIT, 2024).

A pressão de seleção a qual ocorre nos cultivos no Brasil é muito alta devido às grandes áreas cultivadas, a frequência de aplicação, utilização de subdoses e aplicações curativas as quais ocorrem a partir da doença instalada (JULIATTI; JULIATTI;

FIGUEIRÓ, 2015). A resistência é uma resposta evolutiva natural dos fungos, aonde o fungicida atua em único alvo, com pressão de seleção específica, favorecendo surgir populações menos sensíveis a esse modo de ação específico (HAWKINS *et al.*, 2019). Até a safra de 2007/2008, os fungicidas tebuconazol e flutriafol eram os mais eficientes e amplamente utilizados, porém, populações de *Phakopsora pachyrhizi* menos sensíveis aos DMI's passaram a ser observadas no campo (FARIAS; ABDELNOOR; GODOY, 2014). Nesse caso, Schmitz *et al.* (2013), evidenciaram resistência cruzada (isolados de um fungicida o qual podem ser isolados a outros com mesmo modo de ação) relacionadas a mutação e super expressão no gene CYP51 e redução na expressão de transportadores na safra 2013/2014.

O FRAC (2023) determinou a existência de alta variabilidade da sensibilidade a DMI's entre as populações de ferrugem asiática da soja no Brasil, com mutações pontuais nos códons F120L, Y131H, Y131F, I145F, K142R, I475T, V130A, dentre outras. Ao avaliar a eficiência de fungicidas para controlar a FAS no Brasil, Embrapa (2023) observou, nas últimas safras, mudanças de sensibilidade da *P. pachyrhizi* aos IDM com relação ao protioconazol e tebuconazol, sendo atribuídas a novas mutações ao gene V130A. Na safra 2021/2022 o protioconazol reduziu mais a severidade em relação ao tebuconazol, porém, na 2022/2023 o tebuconazol obteve essa menor severidade. A eficiência dos triazóis alterou entre regiões do país e dentro das regiões, vindo a evidenciar a presença de populações com sensibilidade diferenciada no mesmo ambiente. Ademais, observou-se baixa eficiência de controle quando utilizado os ingredientes ativos de modo isolado.

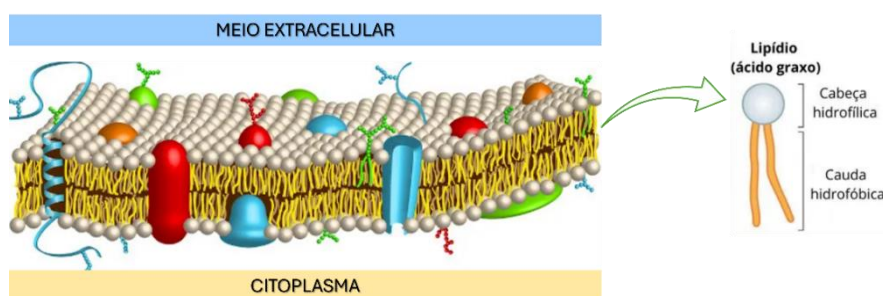
Em testes *in vivo* com tebuconazol, ciproconazol, epoxiconazol, protioconazol e piraclostrobina houve redução de sensibilidade da FAS ao tebuconazol, mas não a piraclostrobina, sendo variável de acordo com a dose e formulação dos ingredientes comerciais (REIS; DEUNER; ZANATTA, 2015). Testes de germinação de esporos evidenciaram eficiência do protioconazol, epoxiconazol e fungicidas multissítios, mas redução da mesma com ciproconazol e tebuconazol, fazendo-se necessário a associação de diferentes moléculas para o manejo eficaz (JULIATTI *et al.*, 2017). Alves e Juliatti (2018) observaram potencialização no controle da FAS quando houve adição de mancozebe às misturas fluxapiroxade + piraclostrobina, azoxistrobina + benzovindiflupir, trifloxistrobina + protioconazol e tebuconazol + picoxistrobina e Garcés-Fiallo e Forcelini (2013) evidenciaram a eficácia da mistura de triazol +

estrobilurina (strobimix) em relação ao triazol. Portanto, reforça-se a necessidade da associação dos IDMs com multissítios, estrobilurinas ou carboxamidas, visando minimizar a pressão de seleção sobre a população de patógenos.

1.4.3 Sistemicidade de fungicidas

A sistemicidade descreve a absorção, transporte e distribuição de um ingrediente ativo, isto é, a capacidade de um fungicida em fornecer proteção às plantas em áreas as quais receberam diretamente ou não sua aplicação (OLIVER; BECKERMAN, 2022). Dentre os muitos fatores os quais interferem essa translocação, está a cutícula, uma fina película superficial composta de lipídios solúveis e poliméricos, a qual possui a função de proteger os tecidos vivos de plantas contra a perda de água (STEFANELLO *et al.*, 2017). Dessa forma, a absorção do ingrediente ativo por meio da cutícula é determinado mediante a sua lipofilicidade. Esta também pode ser chamada de Coeficiente de Partição ou Valor ($\log P$) ou Coeficiente de Partição Octanol-Água (Kow ou Pow), e descreve a capacidade da molécula se dissolver em soluções lipofílicas (não aquosas) e em água, permitindo a permeação por meio de membranas biológicas (Figura 1) (TEICHER, 2017). Esse valor é obtido por quantificar a concentração do composto no octanol em relação a sua concentração em água.

Figura 1 – Modelo do mosaico fluido de Singer e Nicholson.



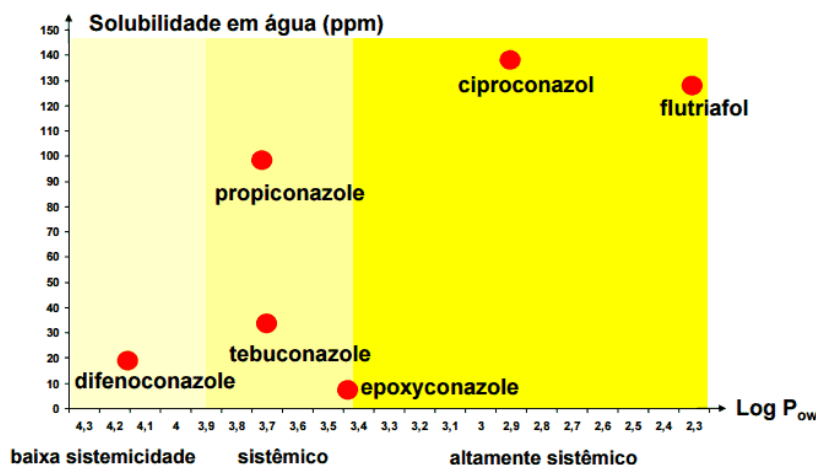
Os valores de $\log Kow$ variam entre 2 e 7. Quanto mais baixos esses valores, maior a solubilidade em água e menor a lipofilicidade (Tabela 1).

Tabela 1 – Log Kow de moléculas do grupo químico das estrobilurinas.

Estrobilurinas	Log Kow
Azoxistrobina	2.5
Kresoxim-metil	3.4
Picoxistrobina	3.6
Piraclostrobina	4.0
Trifloxistrobina	4.5

Fonte: adaptado de: Bartlett (2002).

Portanto, se menor a lipofilicidade, maior é a mobilidade da molécula em água, ou seja, mais sistêmicos via xilema, capaz de chegar com maior facilidade e velocidade até os locais na folha ou ramos o qual o patógeno está colonizando o hospedeiro (Figura 2) (GOTARDI, 2022). Porém, menor capacidade de atravessar a camada de cera, ou seja, menor absorção, e menor capacidade de se movimentar na membrana lipoprotéica, sendo necessário a aplicação de adjuvantes capazes de reduzir sua espessura ou torná-lo solúvel em lipídeos e permeável (ARRUDA; SILVA, 2013).

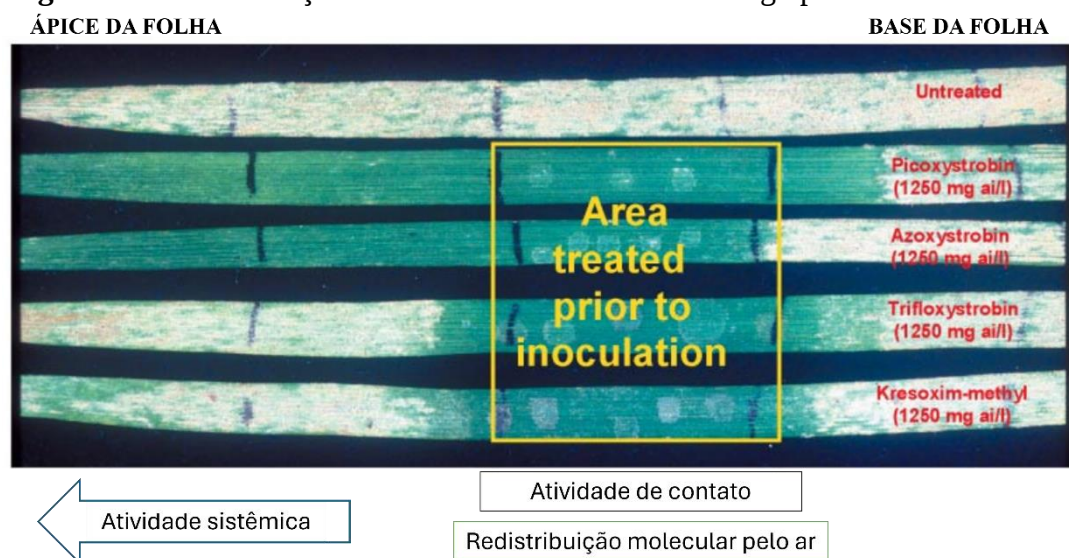
Figura 2 – Solubilidade em água e log Kow de moléculas do grupo químico dos triazóis.

Fonte: adaptado de Juliatti; Azevedo; Juliatti (2017).

Dentre os fungicidas sistêmicos mesostêmicos, está o grupo das estrobilurinas. Por conta da alta afinidade com a superfície foliar, suas moléculas podem ser absorvidas de duas formas: 1) redistribuição translaminar (mesostêmica), contínua por meio da camada de cera, isto é, movimenta-se no mesófilo foliar, entre a epiderme superior e a inferior, com translocação vascular mínima via xilema, passando no passo a passo de dissolução, partição da superfície da folha por meio da camada de cera para a cutícula e

depois para o apoplasto da folha, difusão por intermédio do mesofilo e acumulação de composto suficiente no lado oposto da folha para inibir o patógeno ataque e 2) formação de vapores, os quais dependem da volatilidade e lipofilicidade do ingrediente ativo. Há a formação de depósitos na superfície do órgão suscetível em forma de vapor e reabsorção por meio da cera da cutícula ou da fração, a qual penetra no tecido foliar. Tais depósitos são caracterizados como lipofílicos por serem altamente coesos, com resistência a intempéries, irrigação e lixiviação pluvial e com longo efeito residual (Figura 3) (KLITTICH; RAY, 2013; KLITTICH, 2014; REIS; REIS; CARMONA, 2019; BALARDIN, 2021). Segundo Antuniassi & Baio, (2004), o sucesso na eficácia de controle da ferrugem, está relacionada à maior penetração de gotas no dossel da planta, mesmo para fungicidas de ação sistêmica, devendo assim, ser usadas gotas finas ou muito finas.

Figura 3 – Redistribuição de estrobilurina em folhas de trigo para o controle de míldio.



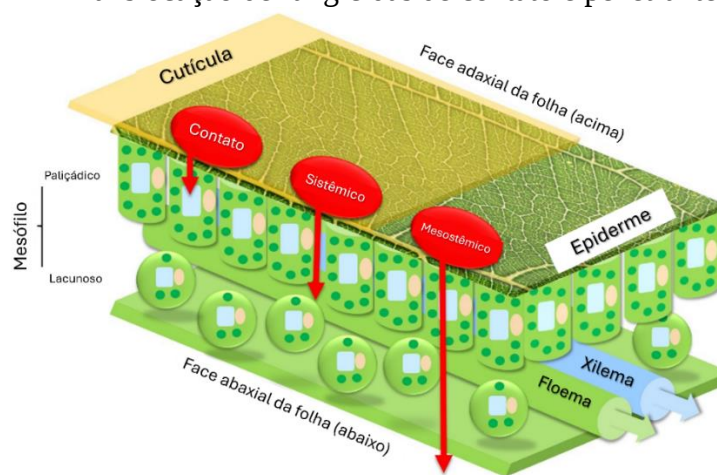
Fonte: adaptado de Bartlett (2002).

Em experimentos de sistemicidade na soja, Santos (2016) comparou a sistemicidade de epoxiconazol, fluxapiroxade e piraclostrobina, concluindo-se a translocação mais limitada e lenta de piraclostrobina a longas distâncias, tendo ficado retida ao folíolo aplicado, reiterando a característica não sistêmica dessa estrobilurina. Ao testar a sistemicidade na soja, das moléculas picoxistrobina, azoxistrobina, trifloxistrobina e piraclostrobina, Gotardi (2022) observou a capacidade da picoxistrobina se mover de forma acropetal, ou seja, do seu ponto de aplicação ao ápice da folha, via xilema, mesmo com valores medianos de log Kow (coeficiente usado para medir a

lipofilicidade e solubilidade em água da molécula), e, apesar da azoxistrobina ter obtido baixos valores de log Kow e realizado movimentação acropetal, esta não foi o suficiente para promover o controle da doença.

Diferente das estrobilurinas, os triazóis são redistribuídos a longas distâncias, no sentido do ápice da folha, sendo chamados de fungicidas móveis no xilema ou acropetais, pois movem-se para cima a partir do ponto de entrada por meio do xilema da planta (Figura 4) (OLIVER; BECKERMAN, 2022).

Figura 4 – Translocação de fungicidas de contato e penetrantes.



Por outro lado, fungicidas de contato são pouco absorvidos quando depositados na superfície foliar, pois possuem baixos valores de log Kow, ou seja, baixa lipofilicidade (Tabela 2). Desse modo, aderem-se fortemente a camada de cera da cutícula, região altamente lipofílica, possuem baixa solubilidade em água, tanto entre as células quanto no citoplasma e translocação foliar, vindo a formar apenas uma camada protetora sobre o tecido vegetal (Figura 4). Portanto, fungicidas de contato devem ser aplicados antes da deposição dos esporos sobre a folha, tornando-os também conhecidos como fungicidas protetores (WANG; LIU, 2007; BECKERMAN, 2008). Estes químicos são classificados no FRAC (2024) como multissítios com múltiplos mecanismos de ação (Fungicidas M, código FRAC M01-M11), pois causam interferências simultâneas na célula fúngica, afetando a respiração celular, a permeabilidade da membrana, na formação de enzimas e de membranas (PAULA, 2018). Os principais fungicidas protetores são o grupo dos cúpricos (hidróxido de cobre, oxicloreto de cobre e óxido cuproso), clorotalonil ou isofitalonitrila e mancozebe (FRAC, 2024).

Tabela 2 – Log Kow de moléculas de fungicidas de contato.

Fungicidas de contato	Log Kow
Cúpricos (Hidróxido de cobre, Óxido cuproso e Oxicloreto de cobre)	0.44
Mancozebe	2.30
Clorotalonil	2.94

Fonte: adaptado de Pesticide Properties Database (2024).

A sistemicidade de fungicidas específicos (estrobilurina e triazol), para controlar a FAS, já foi avaliada em experimento conduzido sob condições controladas. Entre as estrobilurinas, a azoxistrobina e a piraclostrobina tiveram redistribuição por toda a folha, ou seja, mesosistemicidade. No grupo dos triazóis, o ciproconazol apresentou movimento rápido e em altas concentrações por toda a folha, por meio do xilema, seguindo o fluxo de transpiração, demonstrando sistemicidade, enquanto o epoxiconazol teve translocação mais lenta nas nervuras, mas foi redistribuído na folha com o passar do tempo (SYNGENTA, 2003). Porém, quando foi feito o strobimix das moléculas, e foi avaliado o porcentual de área acima do ponto de aplicação em folhas de soja, os tratamentos com azoxistrobina + ciproconazol controlaram totalmente a doença em toda a extensão das folhas, enquanto a piraclostrobina + epoxiconazol não, mostrando a translocação mais rápida do primeiro strobimix em relação ao segundo (EMBRAPA, 2005). Tal fato se repete no estudo de aplicação de fungicidas a base de triazol e suas misturas, conduzido em 2003, na Fundação MT. Quando se aplicou produto no centro, na base e no ápice das folhas de cultivares de soja BR 154 nos estádios fenológicos R2 e R3, a maior sistemicidade foi de flutriafol, seguido de tebuconazol e, novamente, a mistura de piraclostrobina + epoxiconazol ficou por último, com translocação mais lenta (JULIATTI; AZEVEDO; JULIATTI, 2017).

Porém, a translocação e a eficiência do fungicida não depende somente do Log Kow, mas da formulação do fungicida, dos seus adjuvantes, por exemplo, agentes tampão, para controlar o pH, antioxidantes, estabilizantes, fotoestabilizantes, entre outros. Além do mais, as misturas de tanque, a temperatura e a umidade relativa durante a pulverização, a tecnologia de aplicação, a qualidade da água de pulverização, o volume de calda e muitos outros itens do processo podem influenciar a sistemicidade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram conduzidos na Universidade Federal de Lavras, Laboratório de Epidemiologia, Departamento de Fitopatologia, em casa de vegetação, sob condições controladas de temperatura e umidade relativa. Foram cultivadas sementes de soja da cultivar Olimpo IPRO®. O delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC), compostos por seis tratamentos e quatro repetições, essas a serem especificadas em cada ensaio.

2.1 Monitoramento de temperatura e umidade

Durante o período experimental, foram monitoradas as variáveis ambientais temperatura e umidade relativa do ar dentro da casa de vegetação, com o datalogger TZone Digital. Os registros foram feitos a cada hora, com o período de coleta variando de acordo com a duração de cada experimento.

2.2 Obtenção de inóculo e inoculação

Folhas de soja, naturalmente infectadas, foram coletadas em lavouras próximas à cidade de Lavras-MG. As pústulas contidas nessas folhas foram raspadas com pincel e colocadas em microtubos de 1,5 mL, os quais foram armazenados em ‘deep freezer’ à -80°C. Quando as plantas atingiram o estágio fenológico V4, essas foram inoculadas com suspensão de $1,0 \times 10^5$ uredinósporos de *P. pachyrhizi*/mL de água + tween 20 a 0,05%, preparada no momento da inoculação. Essa suspensão foi aplicada com pulverizador de 1 litro, de plástico, manual, nas faces abaxial ou adaxial das folhas de soja, até o ponto de escorrimento, sete dias após a aplicação dos fungicidas de cada tratamento. Ou seja, os ensaios avaliaram o efeito protetor dos fungicidas. Após a inoculação, as plantas foram cobertas com saco plástico por 12 horas, para proporcionar as horas de molhamento foliar para os patógenos germinar e penetrar.

2.3 Eficácia

Foi calculada a eficácia dos tratamentos, comparados à testemunha, por meio da equação de Abbott (1925).

$$E\% = \left(\frac{n \text{ Testemunha} - n \text{ Tratamento}}{n \text{ Testemunha}} \right) \times 100$$

No qual: n = Severidade da doença

2.4 Ensaio I – Solução Nutritiva

O primeiro ensaio foi montado para avaliar a sistemicidade de fungicidas do grupo químico das estrobilurinas e de um triazol, quando aplicados em solução nutritiva. A parcela experimental foi composta por vasos de 5L contendo solução nutritiva e cada repetição foi composta por um vaso contendo duas plantas.

2.4.1 Solução nutritiva e produção das plantas de soja

A solução nutritiva para as plantas foi preparada a partir da solução básica de Hoagland e Arnon (1950) e doses de B, Zn e Mn balanceadas com ácido bórico (H_3BO_3), sulfato de zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e sulfato de manganês (MnSO_4), respectivamente, como fontes desses elementos. As fontes dos macronutrientes foram NH_4NO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , KCl , KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Os sais de micronutrientes usados para compor a solução estoque foram H_3BO_3 (2.8 mg L^{-1}) $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (0.22 ml L^{-1}), $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (3.0 ml L^{-1}), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.08 ml L^{-1}), $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (0.02 ml L^{-1}) e 1.0 ml L^{-1} Fe-EDTA (PÉREZ *et al.*, 2020).

Após a emergência das plântulas em areia, estas foram transferidas para bandejas de 10 litros, contendo solução nutritiva a 50% da força iônica, sob aeração contínua, durante 10 dias para adaptação das plântulas. Após esse período, as plantas foram selecionadas com base na uniformidade de tamanho. Dessa forma, duas plantas foram transplantadas para baldes plásticos com capacidade de 5,0 L, pintados com tinta reflexiva. Nesses vasos a solução nutritiva estava com 100% da força iônica e o devido tratamento com aeração constante, proporcionada por sistemas de mangueiras conectadas aos vasos e compressor pneumático. Semanalmente, foi realizado o monitoramento do pH da solução nutritiva, mantendo-o entre 5,0 e 5,5 com a adição de HCl $0,1 \text{ mol. L}^{-1}$ ou NaOH $0,1 \text{ mol. L}^{-1}$. O volume dos vasos foi completado com água deionizada, quando necessário.

Inicialmente, para avaliar o efeito de fitotoxidez dos princípios ativos avaliados, foram realizados experimentos com quatro doses em solução nutritiva a 100, 50, 20 e 15%, em relação a dose recomendada em campo, ou seja, de bula. Os fungicidas foram misturados diretamente na solução nutritiva com uma pipeta. Para avaliar a dose ideal a ser utilizada foi selecionada, visualmente, a dose com a menor intensidade de sintomas de queima e enrugamento de folhas.

Tabela 3 – Diferentes porcentagens de fungicidas em experimento de fitotoxidez.

Tratamento	Dose (gi.a./ha) [#]	50% da dose (gi.a./ha)	20% da dose (gi.a./h a)	15% da dose (gi.a./h a)	gi.a./5L em 15% das doses
Testemunha	---	---	---	---	---
Tebuconazol	100	50	20	15	0,375
Piraclostrobina	60	30	12	9	0,225
Picoxistrobina	60	30	12	9	0,225

#: Considerando o volume de calda de 200L/ha para pulverização terrestre; *. Fonte: Da autora (2024).

2.4.2 Método de avaliação da severidade da ferrugem asiática da soja e eficácia

Após surgirem os primeiros sintomas do patógeno, foram realizadas dez avaliações da severidade da FAS no folíolo central de todos os trifólios de cada uma das duas plantas em cada vaso, a cada 3 dias, por meio de escala diagramática. Posteriormente, foi calculada a AACPD e a eficácia de cada tratamento em relação a testemunha.

2.4.3 Metodologia de avaliação da severidade da ferrugem asiática da soja

A severidade foi avaliada com a escala diagramática proposta por Franceschi *et al.* (2020), com 10 níveis de porcentagem de área foliar lesionada (0,2, 1, 3, 5, 10, 25, 40, 55, 70 e 84%). As avaliações foram feitas no folíolo central dos trifólios da soja. Os valores de severidade foram integralizados em área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD), segundo a equação (SHANER; FINNEY, 1977):

$$AACPD = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(Y_i + Y_{i+1})}{2} * (T_{i+1} - T_i)$$

Onde:

AACPD = área baixo da curva de progresso da doença;

Y_i = proporção da doença na i-ésima observação;

T_i = tempo, em dias, na i-ésima observação;

n = número total de observações.

2.4.4 Método de avaliação do peso da parte aérea seca e peso da raiz seca

Finalizadas as avaliações, coletou-se toda a parte aérea e as raízes das plantas de soja. As amostras foram lavadas com água destilada e armazenadas em sacos de papel para serem secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por três dias, até atingirem peso constante. Logo após, determinou-se o peso da parte aérea seca (PPAS) e o peso de raiz seca (PRS) médio de todas as plantas em cada vaso, em balança de precisão.

2.5 Ensaio II – Translocação foliar de fungicidas dos grupos químicos das estrobilurinas e dos triazóis

No segundo ensaio, os fungicidas foram aplicados no terço médio do folíolo central do 3º trifólio, de cima para baixo, da planta de soja (estádio fenológico V4), a fim de verificar sua sistemicidade, de forma acropetal e basipetal. Essa pulverização não possibilitou escorrimento. Sete dias após aplicar os produtos, foi realizada a inoculação da *P. pachyrhizi*. A parcela experimental foi composta por quatro plantas em vasos de 3L com substrato comercial Carolina Soil. Para a análise estatística, foi realizado um esquema fatorial 6 x 3, onde o fator A foi composto por testemunha, tebuconazol, piraclostrobina e picoxistrobina e o fator B foi constituído por terço superior, médio e inferior do folíolo central.

Tabela 4 – Doses dos fungicidas aplicados via foliar

Tratamento	Dose utilizada (g i.a./ha) [#]	Quantidade de produto (mL) para 0,5 L
Testemunha	---	---
Tebuconazol	100	1,25
Piraclostrobina	60	1,2
Picoxistrobina	60	1,2

[#]: Considerando o volume de calda de 200L/ha para pulverização terrestre. Fonte: Da autora (2024).

Essa aplicação foi realizada com um mini aspersor na face adaxial das folhas (Figura 5), enquanto o inóculo foi aplicado em todos os trifólios das plantas, nas duas faces.

Figura 5 – Aplicação de fungicida no folíolo central de plantas de soja.



Fonte: Da autora (2024).

2.5.1 Método de avaliação da severidade da ferrugem asiática da soja nos terços superior, médio e inferior do folíolo central e eficácia

Após surgirem os primeiros sinais do patógeno, foram realizadas seis avaliações de severidade da FAS no folíolo central do trifólio onde houve a aplicação, em cada uma das quatro plantas. A avaliação foi feita a cada 3 dias, por meio de escala diagramática.

Depois da sexta avaliação visual da severidade da FAS, todos os folíolos centrais foram retirados e imediatamente escaneados. A severidade da FAS foi determinada em cada terço do folíolo, por meio do software de acesso livre ImageJ® v. 1.54g (National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA) (RASBAND, 2015). Foi considerada apenas a área de esporulação em tons de marrom. Sendo assim, foi calculada a severidade (%), do terço médio e do inferior e superior, para avaliar o controle devido a sistemicidade basipetal e acropetal dos fungicidas, respectivamente.

Posteriormente, foi calculada a eficácia de cada tratamento em relação a testemunha.

2.6 Ensaio III - Análise dos compostos associados a resistência

No terceiro ensaio, foram plantadas dez sementes e após a emergência, selecionadas as cinco plantas mais vigorosas por repetição, visando a futura coleta, de cada uma, em cinco tempos para análise bioquímica. Cada vaso da repetição continha 3L do substrato comercial Carolina Soil. Os fungicidas foram aplicados no estágio fenológico V4, em toda a planta, em ambas as superfícies da folha, com pulverizador plástico manual de 2L, com as mesmas doses do ensaio II (Tabela 4), visando a análise dos compostos associados a resistência, formados a partir de plantas pulverizadas com

fungicidas. Sete dias após a aplicação dos produtos, foi realizada a inoculação da *P. pachyrhizi*.

2.6.1 Método de coleta para análise da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL), compostos fenólicos solúveis totais e lignina

Foram coletados o segundo e o terceiro trifólios das plantas de soja. Cada uma das cinco plantas foi amostrada em um dos cinco tempos de coleta, ou seja, 0 (antes da inoculação), 24, 48, 72 e 96 horas após a inoculação. Conforme foi realizada a coleta, a planta foi identificada com amarelo na base do caule, a fim de evitar duas coletas de diferentes tempos na mesma planta. Os trifólios foram imediatamente armazenados em envelopes de papel alumínio e armazenados em 'deep freezer' à -80°C, para preservação. Posteriormente, as amostras foram maceradas em nitrogênio líquido e adicionado polivinilpirrolidona a 1%. Um 1,5mL de tampão de extração (100 mM de fosfato de potássio; pH 7,0) por 200 mg de tecido. Após a centrifugação, o sobrenadante foi usado para determinar atividades enzimáticas (BIEMELT; KEETMAN; ALBRECHT, 1998). A atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) foi determinada usando o método modificado de Mehta & Bhavnarayana (1981). Para 220 µL de extrato enzimático, 25 mM de Tris-HCl 40 mM (pH 8,8) e foram adicionados 25 mM de L-fenilalanina 87,5 mM. A solução foi incubada a 37 °C por 60 min e a absorbância foi medida a 290nm. O coeficiente de extinção molar (ϵ)=2235 M⁻¹/ cm foi usado para calcular a atividade PAL.

A análise bioquímica de compostos fenólicos solúveis totais e lignina solúvel foi feita a partir da maceração do tecido foliar. Logo após, a amostra foi liofilizada e homogeneizada (± 30 mg) usando metanol a 80%. O sobrenadante foi utilizado para quantificar compostos fenólicos totais e o precipitado para quantificar a lignina. Foi utilizado o método de Spanos & Wrolstad (1990) para quantificação de compostos fenólicos: o sobrenadante foi misturado com reagente 0,25 N de Folin-Ciocalteu e foram adicionados 1 M de Na₂CO₃ e água destilada. A reação volume foi de 200 µL e a absorbância foi quantificada usando um espectrofotômetro a 725 nm. O conteúdo de composto fenólico total (µg de tecido seco equivalente a mg⁻¹ clorogênico ácido) foi calculado com base em uma curva padrão produzida a partir de ácido clorogênico. Para quantificar a lignina, o precipitado foi homogeneizado com 80% de metanol, e após centrifugação, a reação foi incubada em estufa a 45°C *overnight*. Posteriormente, foram adicionados ácido tioglicólico e 2 M de HCl (na proporção de 1:10) e a solução foi

colocada em banho-maria a 100°C por 4 horas. A reação foi então centrifugada e o precipitado foi dissolvido em água destilada. Após a centrifugação, o precipitado foi misturado com 0,5 M de NaOH e foi novamente centrifugado. O sobrenadante resultante foi misturado com HCl p.a., e a solução foi incubada a 4 ° C durante 4 h. Após a centrifugação, o precipitado foi ressuspensão em 0,5 M de NaOH e 200 µL da solução foi usada em cada reação. A absorbância foi medida em 280 nm. O conteúdo de lignina (µg por mg de tecido seco) foi calculado usando uma curva padrão Doster & Bostock (1988). A quantificação foi realizada utilizando espectrofotômetro de microplacas PowerWave XS (Biotek), com quadruplicata técnica de cada unidade amostral.

2.6.2 Avaliação das variáveis morfológicas

Na avaliação do crescimento morfológico foram avaliadas as variáveis altura, diâmetro do caule e a expansão foliar em cada uma das cinco plantas de cada vaso. A altura (cm) e a expansão foliar (cm²) foram avaliadas com régua graduada de 40 cm. Na expansão foliar, foi medido comprimento x largura do folíolo central do quinto trifólio. O diâmetro (mm) foi calculado com o uso de paquímetro digital, 2 cm acima do nível do solo. Para cada variável foram realizadas quatro avaliações, a primeira antes da aplicação do inóculo e após a aplicação dos tratamentos e as posteriores após a inoculação, com uma semana de diferença entre cada avaliação.

2.6.3 Avaliação de clorofila

Três leituras foram realizadas durante a condução do ensaio, sendo medido o teor de clorofila em dois pontos distintos do folíolo central do 4º trifólio, em todas as cinco plantas de cada vaso. A primeira medida foi realizada antes da aplicação de fungicidas, a segunda antes da inoculação com *P. pachyrhizi* e a última ao final do experimento, 60 dias após a aplicação de fungicidas.

O teor de clorofila foi calculado a partir das leituras do medidor portátil de clorofila SPAD502® (Minolta Camera Co. Ltda). Posteriormente, foi utilizada a seguinte equação (MORAN; PORATH, 1980; MORAN, 1982) para determinar o teor de clorofila por peso da planta seca (TC, mg.g⁻¹):

$$TC = a + b * s$$

Onde: 'a' (-1,4693) e 'b' (0,3975) se referem aos parâmetros da equação de calibração para cultura da soja e 's' ao valor SPAD observado.

2.6.4 Determinação de peso de planta seca

Para determinar o peso de planta seca, ao final do experimento foi coletada toda a parte aérea de todas as plantas de soja do experimento. As amostras foram lavadas com água destilada e armazenadas em sacos de papel para serem secas em estufa, com circulação forçada de ar a 65°C, por três dias, para atingirem peso constante. Logo após, determinou-se o peso de planta seca em balança de precisão.

2.6.5 Avaliação da camada de cera

Para observar a camada de cera, amostras de tecido vegetal foram coletadas 30 dias após a aplicação dos produtos e preservadas em solução fixadora de Karnovsky (glutaraldeído 2,5%, paraformaldeído 2,0% em tampão cacodilato de sódio 0,05 M, CaCl_2 0,001 M (pH 7,2)) e armazenadas a 4 °C por no mínimo 24 horas. Após as 24 horas, as amostras foram lavadas em tampão cacodilato de sódio 0,05 M por três vezes por 10 minutos cada. Em seguida, as amostras foram desidratadas em gradiente crescente de acetona (25, 50, 75, 90 e 100%) por dez minutos em cada concentração, exceto para 100%, onde foram realizadas três vezes. As amostras foram colocadas em aparelho de ponto crítico (CPD030 Bal-Tec®) para realizar a troca de acetona por CO_2 e assim, finalizar a secagem. Stubs foram revestidos com papel alumino e sobre ele foi colada uma fita de carbono dupla face. Sobre a fita foram colocados os espécimes (material vegetal) em estudo e levados ao aparelho evaporador de ouro (SCD 050 Bal-Tec®), para aumentar a condutividade da amostra por meio das camadas de ouro adicionadas. Posteriormente, as amostras foram observadas em microscópio eletrônico de varredura de ultra-high resolução, livre de campo, modelo CLARA TESCAN®.

2.7 Análise estatística

As variáveis analisadas foram submetidas aos testes de Shapiro-Wilk e Bartlett ($p > 0,05$) para verificar os pressupostos de normalidade e homogeneidade da análise de variância. Atendidos os pressupostos, os dados foram submetidos à análise de variância por meio do teste F ($p \leq 0,05$). As variáveis qualitativas foram comparadas por Teste de Scott-Knott ($p < 0,05$) e as análises estatísticas foram realizadas no software R v. 4.0.2 (R Development Core Team, 2020). Os resultados apresentados referem-se aos valores médios das quatro repetições. Não foi necessário transformação de dados.

3. RESULTADOS

3.1 Monitoramento de temperatura e umidade

As variáveis climáticas foram monitoradas durante os ensaios. Nos ensaios I, II e III as temperaturas médias foram de 20,1, 24,2 e 20,8 °C, enquanto a umidade relativa média foi de 77,5, 77,45 e 81,39%, respectivamente (Figura 6).

Figura 6 – Variáveis climáticas registradas na casa de vegetação: (A) Ensaio I, (B) Ensaio II e (C) Ensaio III.



Fonte: Da autora (2024).

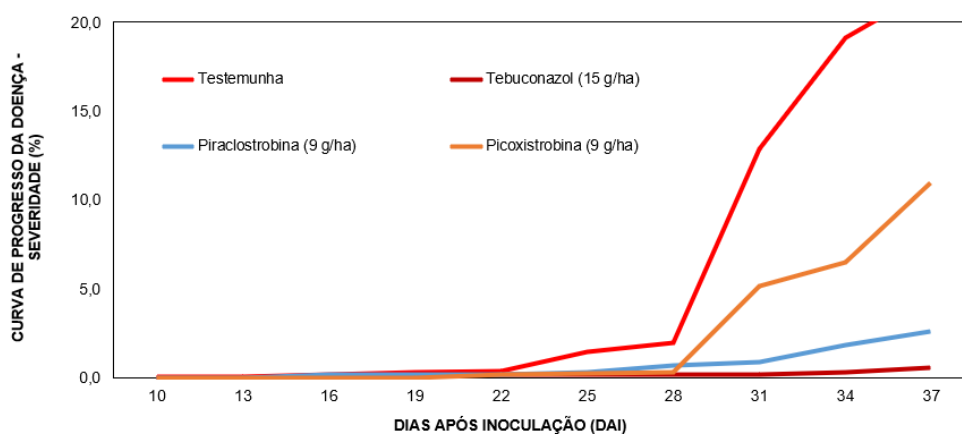
3.2 Ensaio I

Dois dias após a adição dos fungicidas na solução nutritiva nas doses de 100, 50 e 20% da dose de campo, foram observados sintomas de amarelecimento, encarquilhamento, pontos enegrecidos, necrose e murcha, relacionados a fitotoxidez nas folhas, com aumento de intensidade no quinto dia. Porém, em 15% da dose, os níveis de fitotoxidez foram menores e possibilitaram a continuidade do ensaio com a inoculação de *P. pachyrhizi*.

3.2.1 Área abaixo da curva de progresso da doença

Os primeiros sinais da FAS foram observados 10 dias após a inoculação (DAI), ao utilizar 15% da dose de campo dos fungicidas. A severidade aumentou ao longo do tempo na testemunha, a qual passou de 0,1% aos 10 DAI para 20,1% aos 37 DAI, sendo esse o valor máximo de severidade. A piraclostrobina e a picoxistrobina tiveram início no aumento da intensidade da doença após 28 DAI, com 0,7 e 0,3% de severidade, atingindo 2,4 e 10,6%, respectivamente, aos 37 DAI. O tratamento com tebuconazol manteve-se com severidade abaixo de 1% ao longo de todo o experimento (Figura 8).

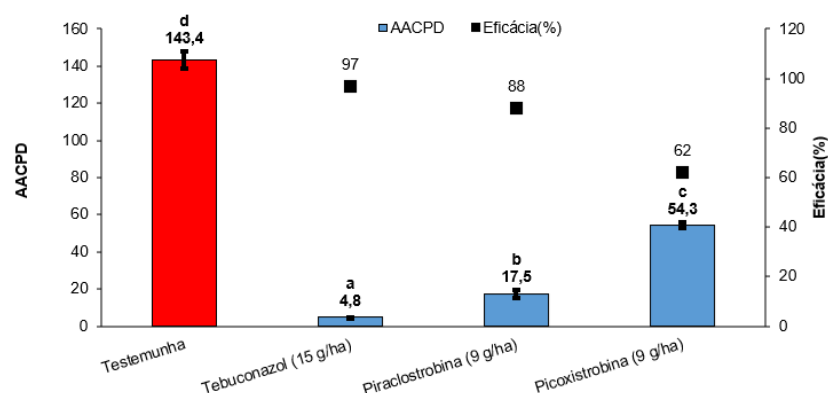
Figura 8 – Curva de progresso da doença (severidade) da ferrugem asiática da soja durante o período de avaliação após a inoculação do patógeno.



Fonte: Da autora (2024).

Houve diferença entre os tratamentos para a AACPD ($p < 0,05$). Os maiores valores foram observados na testemunha com 143,4, seguida da picoxistrobina e da piraclostrobina, com 54,3 e 17,5 e eficácias de 62 e 88%. O tebuconazol proporcionou os menores valores, com 4,8 de AACPD e eficácia de 97% (Figura 9).

Figura 9 – Área abaixo da curva de progresso da doença (AACPD) da ferrugem asiática em plantas de soja pulverizadas com fungicidas dos grupos químicos dos triazóis e estrobilurinas. Médias seguidas por letras iguais nas barras não diferem entre si por meio do teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.



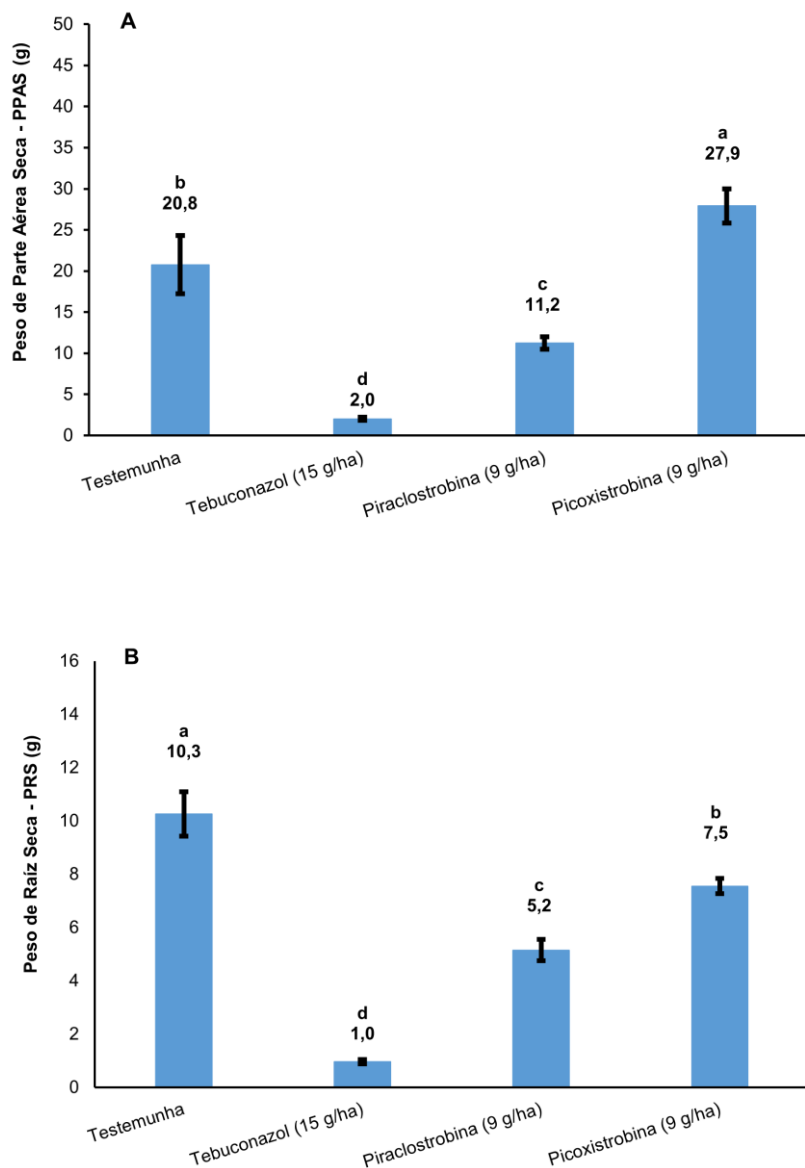
Fonte: Da autora (2024).

3.2.2 Peso de parte aérea seca (PPAS) e das raízes secas (PRS) de plantas de soja

Ocorreu diferença entre os tratamentos para a variável peso de parte aérea seca (PPAS) ($p < 0,05$). A picoxistrobina se destacou com peso médio de 27,9 g, superior em 34,13% da testemunha, a qual obteve peso médio de 20,8 g. A piraclostrobina foi seguida do tebuconazol, com 11,2 e 2,0 g de PPAS (Figura 10 A)

Para a variável peso de raízes secas (PRS), a testemunha diferenciou-se dos demais tratamentos ($p < 0,05$) com 10,3 g, seguida da piraclostrobina, piraclostrobina e tebuconazol, com 7,5, 5,2 e 1,0 g, respectivamente, de PRS (Figura 10 B).

Figura 10 – Peso de parte aérea seca (PPAS) (A) e das raízes secas (PRS) (B) de plantas de soja submetidas a diferentes tratamentos via solução nutritiva. Médias seguidas por letras iguais nas barras não diferem entre si, por meio do teste Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Da autora (2024).

Foram observados sintomas de fitotoxidez mesmo em 15% da dose de campo do fungicida na solução nutritiva, exceto na testemunha. Nas plantas dos tratamentos tebuconazol, e piraclostrobina foram observados sintomas de fitotoxidez com maior intensidade, com inúmeros pontos enegrecidos nas folhas e hastes, escurecimento das nervuras das folhas com gradual murcha e seca das folhas. Nos tratamentos e picoxistrobina ocorreram os mesmos sintomas, porém, em menor intensidade.

3.3 Ensaio II

3.3.1 Severidade da ferrugem asiática da soja nos terços superior, médio e inferior do folíolo central

Houve interação entre os fatores para a variável severidade da FAS ($p < 0,05$) (Tabela 5).

No desdobramento do tratamento dentro de cada nível de terço, todos os fungicidas diferenciaram-se da testemunha em todos os terços ($p < 0,05$). No terço superior, a testemunha obteve 33,84 de severidade, enquanto o tebuconazol, picoxistrobina e piraclostrobina obtiveram média de 6,30 de severidade, ou seja, 81,38% menor em relação a testemunha. No terço médio, onde houve aplicação dos tratamentos, a testemunha teve 29,37 de severidade, seguida da média dos tratamentos de 5,22 de severidade, isto é, 82,23% menos severo em relação a testemunha. No terço inferior, a testemunha obteve 33,76 de severidade e a média de severidade dos demais tratamentos foi de 5,79, ou seja, 82,85% menor severidade da doença. No desdobramento dos terços dentro de cada tratamento, apenas a piraclostrobina diferenciou-se dos demais tratamentos ($p < 0,05$), com a severidade do terço superior mais elevada em relação aos terços médio e inferior.

Tabela 5 – Severidade média da ferrugem asiática da soja nos terços superior, médio e inferior do folíolo central. Médias seguidas por mesmas letras na coluna não diferem entre si, por meio do teste Scott-Knott a 5%.

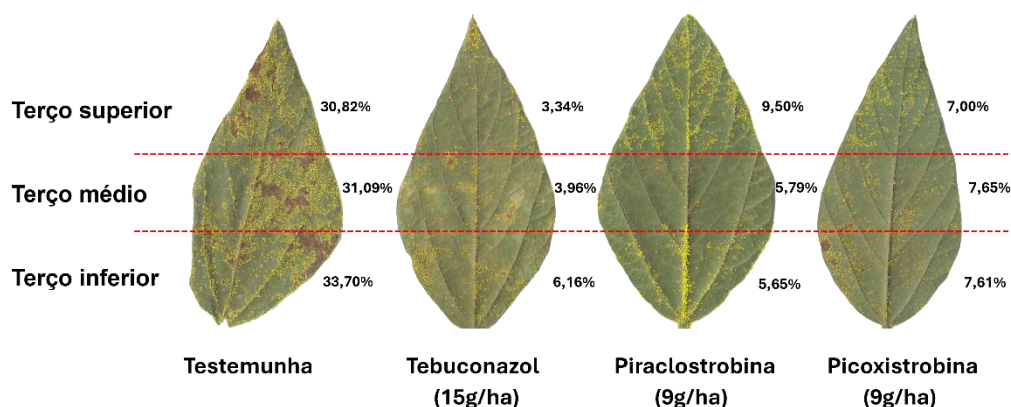
Tratamento	Severidade (%)		
	Superior	Médio	Inferior
Testemunha	33,84aA	29,37aA	33,76aA
Tebuconazol	2,97cA	3,95bA	4,98bA
Piraclostrobina	9,96bA	5,08bB	4,74bB
Picoxistrobina	5,99cA	6,64bA	7,65bA

CV = 26,41%

Fonte: Da autora (2024).

Quando mensurados os folíolos centrais de cada tratamento, ratificou-se os resultados de severidade do fatorial (Figura 11).

Figura 11 – Folíolo central representativo de cada tratamento.

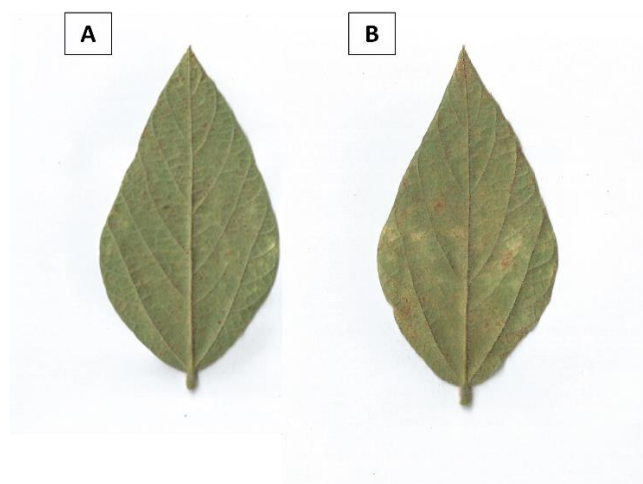


As linhas tracejadas em vermelho delimitam o terço médio, local onde os fungicidas foram aplicados. Fonte: Da autora (2024).

3.3.2 Sintomas de fitotoxidez em plantas de soja

Houve a ocorrência de sintomas de fitotoxidez em algumas plantas do tratamento tebuconazol (Figura 12). Foi possível observar áreas cloróticas no terço médio do folíolo, onde foi realizada a aplicação do fungicida (Figura 12 A). Em casos mais severos, ocorreu a necrose do tecido foliar (Figura 12 B).

Figura 12 – Sintomas de fitotoxidez em folha de soja após a aplicação de tebuconazol.



A: folíolo sem sintomas de fitotoxidez; B: folíolo com sintomas de fitotoxidez.

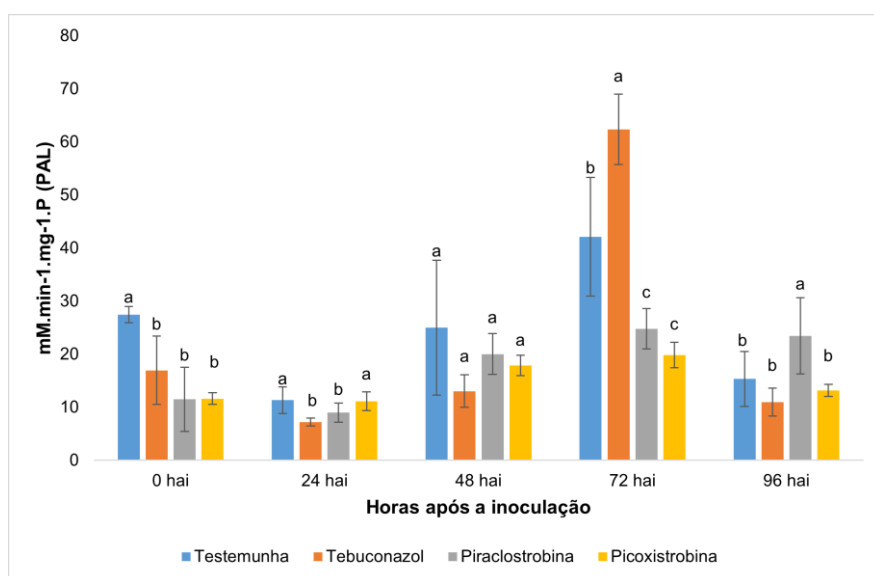
3.4 Ensaio III

3.4.1 Avaliação da enzima PAL, fenóis totais e lignina

Nas plantas de soja coletadas ao sétimo dia após a pulverização com fungicidas e imediatamente antes da inoculação de *P. pachyrhizi* (0 horas antes da inoculação), foi observada na testemunha a maior atividade enzimática da PAL, com $27,45 \text{ mM} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$.

¹.P, sendo diferente dos demais tratamentos ($p < 0,05$). O tebuconazol, piraclostrobina e picoxistrobina obtiveram o valor médio de $13,36 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$ (Figura 13).

Figura 13 – Atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) ($\text{mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$) em plantas de soja pulverizadas com fungicidas antes da inoculação de *P.pachyrhizi* (0), 24, 48 e 72 horas após inoculação (hai). Médias seguidas das mesmas letras nas barras não diferem entre si, por meio do teste Scott Knott a 5%.

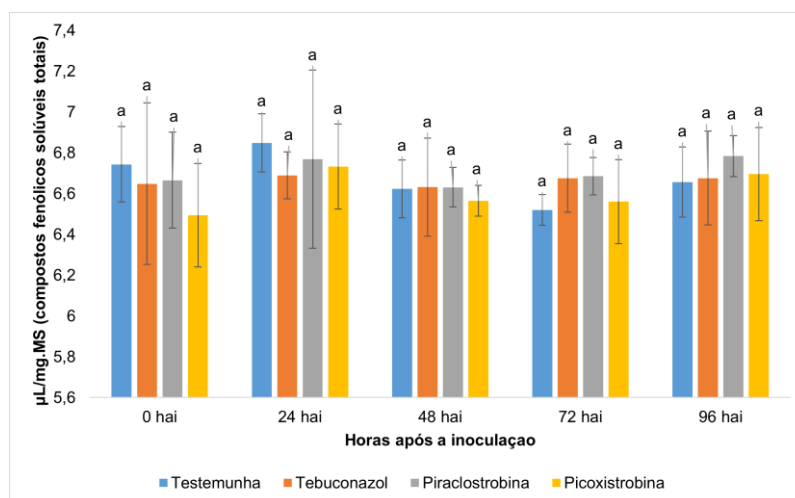


Fonte: Da autora (2024).

Às 24 horas após a inoculação (hai), a testemunha e a picoxistrobina alcançaram média de $11,24 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$, diferenciaram-se do tebuconazol e da piraclostrobina ($p < 0,05$), os quais obtiveram média de $8,11 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$. Às 48 hai, não houve diferença estatística ($p < 0,05$), com média de $18,99 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$ dos tratamentos. Às 72 hai, houve um pico de produção da PAL, com destaque para o tebuconazol, com $62,36$, seguido da testemunha com $42,10 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$ e por conseguinte, a piraclostrobina e picoxistrobina com média de $22,31 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$ ($p < 0,05$). Às 96 hai, houve decréscimo em todos os tratamentos, com diferença estatística entre a piraclostrobina e os demais tratamentos ($p < 0,05$). Enquanto a piraclostrobina alcançou $23,45 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$, a testemunha, o tebuconazol e a picoxistrobina obtiveram média de $13,16 \text{ mM.min}^{-1}.\text{mg}^{-1}.\text{P}$.

Não houve diferença entre os tratamentos para os compostos fenólicos solúveis totais ($p < 0,05$) nos cinco tempo de coleta (Figura 14). A média dos tratamentos testemunha, tebuconazol, piraclostrobina e picoxistrobina às 0, 24, 48, 72 e 96 hai foi de $6,63$, $6,75$, $6,61$, $6,61$ e $6,70 \text{ } \mu\text{L/mg.MS}$, respectivamente.

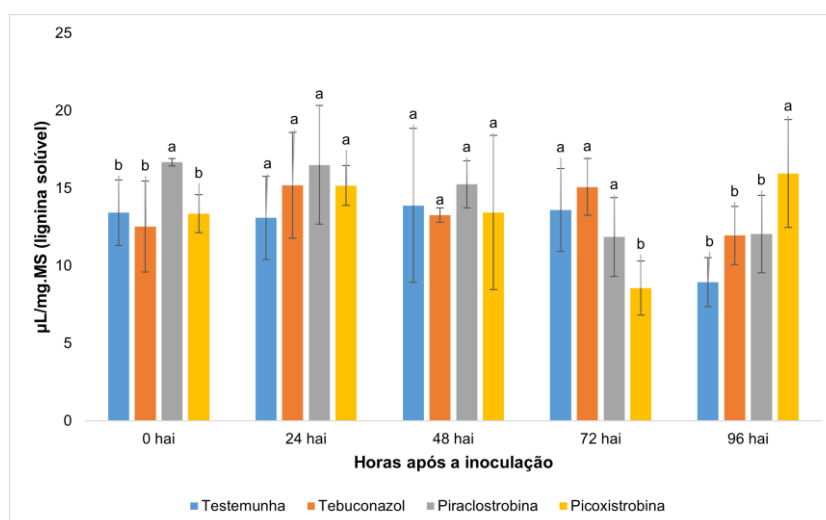
Figura 14 – Efeito dos fungicidas nos teores foliares de compostos fenólicos solúveis totais (micrograma de ácido clorogênico por miligrama de matéria seca - $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$). Médias seguidas das mesmas letras nas barras não diferem entre si, por meio do teste Scott-Knott a 5%.



Fonte: Da autora (2024).

Houve diferença entre os tratamentos para os teores de lignina solúvel ($p < 0,05$). Às 0 hai, a piraclostrobina alcançou 16,68 $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$, enquanto os demais tratamentos obtiveram média de 13,10 $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$. Às 72 hai, a testemunha, tebuconazol e piraclostrobina alcançaram média de 13,51 $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$, seguidas da picoxistrobina com 8,56 $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$. Durante às 96 hai, a picoxistrobina atingiu 15,94 $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$ e os demais tratamentos a média de 10,97 $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$ (Figura 15).

Figura 15 – Efeito dos fungicidas nos teores foliares de lignina solúvel (micrograma de lignina por miligrama de matéria seca - $\mu\text{L}/\text{mg.MS}$). Médias seguidas das mesmas letras nas barras não diferem entre si, por meio do teste Scott-Knott a 5%.



Fonte: Da autora (2024).

4.3.2 Avaliação das variáveis morfológicas

Na avaliação das variáveis morfológicas, não houve diferença ($p < 0,05$) entre os tratamentos para as variáveis diâmetro (mm) de caule, altura (cm) de planta, expansão foliar (cm^2), teor de clorofila (mg. g^{-1}) e peso de planta seca (g) em todas as avaliações.

O valor médio para o diâmetro foi de aproximadamente 4,52 mm na primeira, 4,87 mm na segunda, 5,10 mm na terceira e 5,08 na quarta avaliação (Tabela 6).

Tabela 6 – Avaliação do diâmetro (mm) de caule em plantas de soja tratadas com fungicidas.

Tratamentos	Diâmetro (mm)			
	1ª avaliação	2ª avaliação	3ª avaliação	4ª avaliação
Testemunha	4,43 ns*	5,03 ns	4,92 ns	5,19 ns
Tebuconazol	4,56 ns	4,80 ns	5,08 ns	5,21 ns
Piraclostrobina	4,60 ns	4,80 ns	4,97 ns	4,89 ns
Picoxistrobina	4,59 ns	4,87 ns	5,45 ns	5,07 ns

*ns = não significativo. Fonte: Da autora (2024).

Para a variável altura (cm), de planta o valor médio na primeira avaliação foi de 37,74 cm, seguido de 44,83 cm na segunda, 50,71 cm na terceira e 51,58 na quarta (Tabela 7).

Tabela 7 – Altura (cm) de plantas de soja tratadas com fungicidas.

Tratamentos	Altura (cm)			
	1ª avaliação	2ª avaliação	3ª avaliação	4ª avaliação
Testemunha	37,20 ns*	43,88 ns	48,25 ns	50,38 ns
Tebuconazol	38,55 ns	46,00 ns	53,45 ns	55,08 ns
Piraclostrobina	40,48 ns	47,35 ns	53,55 ns	52,55 ns
Picoxistrobina	34,76 ns	42,13 ns	47,63 ns	48,32 ns

*ns = não significativo. Fonte: Da autora (2024).

Para a expansão foliar (cm^2), o valor médio foi de 13,50, 42,71, 48,42 e 47,59 cm^2 , na primeira, segunda e terceira avaliações, respectivamente (Tabela 8).

Tabela 8 – Expansão foliar (cm^2) de plantas de soja tratadas com fungicidas.

Tratamentos	Expansão foliar (cm^2)			
	1ª avaliação	2ª avaliação	3ª avaliação	4ª avaliação
Testemunha	11,47 ns*	37,05 ns	44,31 ns	43,54 ns
Tebuconazol	15,34 ns	53,31 ns	50,18 ns	49,80 ns
Piraclostrobina	17,89 ns	45,71 ns	50,21 ns	47,46 ns
Picoxistrobina	9,33 ns	34,76 ns	48,98 ns	49,56 ns

*ns = não significativo. Fonte: Da autora (2024).

4.4.3 Avaliação do teor de clorofila

Na avaliação do teor de clorofila, o valor médio foi de 11,58, 12,17, 14,05 e 13,97 mg.g⁻¹ na primeira, segunda, terceira e quarta avaliações, respectivamente (Tabela 9).

Tabela 9 – Teores de clorofila (mg. g⁻¹) em plantas de soja tratadas com fungicidas.

Tratamentos	Teor de Clorofila (mg.g ⁻¹)			
	1 ^a avaliação	2 ^a avaliação	3 ^a avaliação	4 ^o avaliação
Testemunha	11,66 ns*	12,34 ns	14,24 ns	13,58 ns
Tebuconazol	12,29 ns	12,86 ns	14,09 ns	12,99 ns
Piraclostrobina	11,72 ns	11,38 ns	13,65 ns	10,66 ns
Picoxistrobina	10,71 ns	12,09 ns	14,23 ns	14,24 ns

*ns = não significativo. Fonte: Da autora (2024).

4.4.4 Avaliação do peso da planta seca

Na variável avaliação do peso de planta seca, a média dos dados foi de 19,97 g (Tabela 10).

Tabela 10 – Peso de plantas de soja secas tratadas com fungicidas.

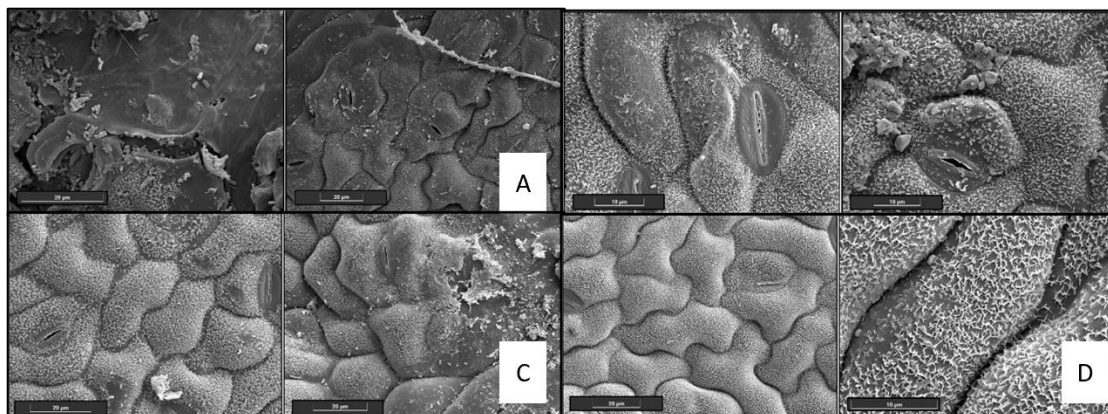
Tratamentos	Peso de planta seca (g)
Testemunha	18,75 ns*
Tebuconazol	21,12 ns
Piraclostrobina	20,50 ns
Picoxistrobina	17,35 ns

Fonte: Da autora (2024).

4.4.5 Avaliação da camada de cera

Por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas amostras de folhas, foi possível observar, em todos os tratamentos, a presença da camada de cera em forma de cristais, porém em níveis distintos (Figura 16). Na testemunha não houve formação homogênea da camada de cera, ou seja, houve pontos com menor densidade dos cristais. Para os demais tratamentos houve intensa deposição de cristais de cera, com alguns próximos aos estômatos. Devido à alta densidade, houve sobreposição dos cristais, formando placas de ceras.

Figura 16 – Eletromicrografia de varredura evidenciando a deposição da camada de cera em folhas de soja, 30 dias após a pulverização de fungicidas.



A: Testemunha; B: Tebuconazol; C: Piraclostrobina; D: Picoxistrobina. Fonte: Da autora (2024).

4. DISCUSSÃO

Durante a realização dos três ensaios, a temperatura média ficou entre 15-25°C e a umidade relativa média variando entre 60-90%, ou seja, ocorreram condições e ambiente favoráveis ao progresso da ferrugem asiática da soja (GODOY *et al.*, 2016; BERUSKI *et al.*, 2020; MATSUO, LOPES, SEDIYAMA, 2022).

No ensaio de solução nutritiva, o tratamento tebuconazol obteve a menor severidade, menor valor de AACPD e maior eficácia no controle da FAS. Apesar disso, a piraclostrobina e picoxistrobina também se diferenciaram da testemunha ($p < 0,05$) e mostraram-se eficientes, demonstrando a clara sistemicidade, por condução via xilema a partir da raiz, de todas as moléculas analisadas. Apesar da utilização de 15% da dose, houve sintomas de fitotoxidez. Uma justificativa para tal seria o fato de os produtos estarem em solução nutritiva e terem sido aplicados em plantas com apenas 21 dias, pois a água é mais prontamente absorvida em raízes jovens, as quais possuem baixa lipofilicidade, além da rota apoplástica favorecer um movimento contínuo da água nas paredes celulares e por espaços extracelulares, sem atravessar qualquer membrana à medida que se desloca ao longo do parênquima vertical da raiz (TAIZ *et al.*, 2017). Além disso, se a aplicação do fungicida, via raiz, for contínua e por longos períodos, até mesmo produtos químicos seguros podem atingir concentrações altas o suficiente para causar queima ou fitotoxidez (CROWDY, 1977). Embora a principal forma de translocação das estrobilurinas seja mesostêmica, ou seja, entre e dentro as células, e com poucos relatos de translocação na dose letal via xilema para a maioria dos fungos, nesse caso, houve absorção ativa do xilema via sistema radicular. Com relação a variável peso da parte aérea

seca (PPAS), a picoxistrobina obteve o maior PPAS, superior à testemunha, mesmo com redução do peso das raízes secas (PRS), devido ao controle da ferrugem, enquanto o tebuconazol demonstrou os valores mais baixos de PPAS e PRS, enquanto a piraclostrobina foi intermediária. Em experimentos com aplicação de triazóis no tomate, Jakl *et al.* (2023) observaram diminuição do peso de caules, folhas e de partes da planta responsáveis por realizar a fotossíntese, pois essa molécula induz maiores condições de oxidação nas plantas. Quando avaliada a eficácia de fungicidas no controle de doenças de final de ciclo da soja, Wruck, Junior & Versari (2023) observaram eficiência e baixa severidade de trifloxistrobina + prothioconazol, porém, a mistura também provocou sintomas de fitotoxidez de intensa desfolha. Li *et al.* (2024) realizaram experimento com azoxistrobina e piraclostrobina em sementes de arroz e avaliaram seu acúmulo nas folhas, observando sintomas de redução de altura e de peso em plantas com altas doses e longa exposição às moléculas.

No ensaio II, a sistemicidade nos terços foi avaliada por aplicação na parte central do folíolo. Todos os tratamentos foram eficientes em relação à testemunha, reduzindo a severidade da doença. A sistemicidade dos fungicidas está relacionada a sua propriedade log Kow, capacidade da molécula se dissolver em soluções lipofílicas e água, camada de cera nas plantas e membranas celulares fúngicas hidrofóbica, além da sua mobilidade no citoplasma, entre as células e nos vasos do xilema, onde existe água (KLITTICH, 2014). Portanto, quanto menor o log Kow, menor lipofilicidade, maior solubilidade em água e maior a sistemicidade, via xilema e de forma mesostêmica na planta (GOTARDI, 2022). Porém, também é desejável a solubilidade em lipídeos para atravessar tanto a camada de cera quanto a membrana lipoproteica das células. O tebuconazol alcançou a menor severidade no terço superior, com 2,97%. Ademais, o triazol avaliado obteve 4,98% de severidade no terço inferior, superando a picoxistrobina, a qual obteve o maior valor entre os tratamentos, de 7,65%, enquanto a piraclostrobina obteve a menor severidade no terço inferior, com 4,74%. Tais resultados são devido aos triazóis possuírem alta sistemicidade e translocação acropetal via xilema, enquanto as estrobilurinas se movem mesosistemicamente e/ou a vapor à pequenas distâncias, com translocação vascular, ou por vasos, mínima. Porém, antes de atingir o xilema no interior do parênquima lacunoso, os triazóis também precisam se movimentar de forma mesostêmica. Ou seja, esse fato também pode possibilitar seu movimento para a parte inferior da folha. Ademais, dentre as demais moléculas testadas, o tebuconazol foi a menor log Kow, com 3,7, vindo a

favorecer a sistemicidade (JULIATTI *et al.*, 2017; SANTOS; SANTOS; FARIA, 2018). Tal observação é ratificada no desdobramento entre terços desse trabalho, pois a piraclostrobina foi o único tratamento com diferença entre terços, com a maior severidade no terço superior e menor nos terços médio e inferior. A eficiência dos triazóis e estrobilurinas no controle da ferrugem da soja foi avaliada por Gotardi (2022) ao realizar experimentos de sistemicidade aplicando tebuconazol, difenoconazol, ciproconazol, protioconazol, picoxistrobina, azoxistrobina, trifloxistrobina, piraclostrobina, benzovindiflupir, bixafen e fluxapiroxade nos terços médio e inferior de folhas no estágio V1 e em trifólios no estágio V3. O tebuconazol, o ciproconazol e a picoxistrobina destacaram-se com o maior controle de severidade, com as três moléculas deslocando-se de forma acropetal. O difenoconazol, piraclostrobina, azoxistrobina e trifloxistrobina e as carboxamidas não se diferenciaram da testemunha. Resultado similar foi exposto por Santos, Santos & Faria (2018) ao avaliar a sistemicidade via xilema de ciproconazol, flutriafol, tebuconazol, azoxistrobina e piraclostrobina no controle do oídio em plantas de soja no estágio V3. Técnicas de análise de imagem de fósforo, realizadas na Syngenta (2003), revelaram a baixa sistemicidade da piraclostrobina em folhas de trigo, a qual restringiu-se às nervuras, pois não possui distribuição a vapor, além de ter movimento translaminar lento por conta do seu valor log Kow de 4,0 (Bartlett *et al.*, 2002). Durante o ensaio II, também houve sintomas de fitotoxidez com o tratamento tebuconazol, porém na dose de 1,25mL de produto/0,5L. Esses sintomas são comuns por conta da alta velocidade de absorção e acumulação dos triazóis nas folhas, com ações fitotóxicas mais intensas se pulverizado em altas temperaturas. Outros fatores a serem levados em consideração são o estresse hídrico, o momento da aplicação, o tamanho da gota de pulverização, cultivar suscetível e aplicação de altas doses, sugerindo cauteloso manejo ao usar essa molécula (ZUNTINI *et al.*, 2019; WRUCK; JUNIOR; VERSARI, 2023).

No ensaio III, foi avaliada a atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL), a quantificação de compostos fenólicos solúveis totais, lignina solúvel e análises morfológicas de diâmetro, altura, expansão foliar, teor de clorofila e peso de planta seca da planta. Observa-se uma elevação nos níveis da atividade da enzima a partir das 48h após a inoculação (hai), mas apenas às 72h hai ocorre o pico das atividades da enzima PAL em todos os tratamentos, com destaque para o tebuconazol e a testemunha, respectivamente. A PAL é uma enzima regulatória chave na biossíntese dos fenilpropanoides dentro da via ácido chiquímico e a partir desta via há a produção de diversos compostos aromáticos

polifenólicos, dentre eles, a lignina, mecanismo de defesa estrutural pós-formado (LIU, LUO, ZHENG, 2018). Ademais, a indução de resistência sistêmica por produtos químicos desenvolve respostas benéficas de defesa da planta, pois aumentam a expressão gênica de enzimas relacionadas à produção de fenólicos protetores, dentre elas, a PAL (LEE; KIM, 2022). Em experimentos de expressão gênica bifásica provocadas por *P. pachyrhizi* na cultivar de soja Ankur, durante as primeiras 12h de inoculação da ferrugem, houve uma explosão da expressão gênica, relacionada a formação e penetração do apressório da ferrugem na epiderme foliar. Entre 24 e 48 horas, o fungo continuou a desenvolver hifas intercelulares no mesófilo foliar, mas sem induzir uma resposta detectável, causando quedas nos níveis de PAL. Após às 72 horas, houve um segundo pico de expressão gênica, relacionado a formação dos haustórios (SCHNEIDER *et al.*, 2011). Em plantas de tomate pré tratadas com azoxistrobina, Anand *et al.* (2007) observaram aumento na síntese de PAL, com seu nível máximo também às 72 horas após o contato com os patógenos *Alternaria solani* e *Septoria lycopersici*, enquanto Ravi *et al.* (2012) observaram aumento dos níveis de PAL às 24h e 72h após a aplicação de compostos azóis heterocíclicos em plantas de *Vigna radiata*.

A partir dos resultados encontrados, não foi observada diferença estatística entre os tratamentos em relação a testemunha na quantificação de compostos fenólicos solúveis totais e nas avaliações morfológicas de diâmetro, altura, expansão foliar, clorofila e peso de planta seca. Porém, na análise de teores foliares de lignina, é observável queda nos teores de lignina da picoxistrobina às 72 hai e pico de sua quantidade às 96 hai. Os demais tratamentos permanecem com valores de média quase inalterados ao longo do tempo, com diminuição às 96 hai. Ademais, todos os tratamentos diferenciaram-se da testemunha ao promover aumento da camada de cera 30 dias após a pulverização. Segundo Fletcher & Gilley (2000), apesar dos triazóis reduzirem a área foliar, eles são capazes de aumentar a cera epicuticular, a largura e a espessura e a quantidade de clorofila. De acordo com Lattanzio (2013) e Careto *et al.* (2014), estresses bióticos e abióticos estimulam o fluxo de carbono das vias metabólicas primárias, pré-formadas, para as secundárias, causando uma realocação dos recursos energéticos do hospedeiro em detrimento do crescimento da planta sob condições naturais. Portanto, uma maneira da planta reduzir os custos desse desvio de energia e manter seu crescimento, é sintetizar compostos de defesa somente após algum grau de dano inicial do patógeno, pois esses recursos são limitados, não podendo ser realizados simultaneamente em todos os processos fisiológicos requisitados.

5. CONCLUSÕES

Todos os tratamentos foram translocados a partir da raiz, via xilema, com destaque para o tebuconazol. Porém, o tebuconazol e a piraclostrobina causaram sintomas de fitotoxidez e redução de PPAS e PRS mesmo em 15% da dose, provavelmente por conta da ausência de suberina nos pelos radiculares e regiões de alongamento, as quais diminuem as barreiras de translocação e aumentam a sistemicidade desses ingredientes ativos. Quando avaliada a sistemicidade dos fungicidas nos terços, tebuconazol destacou-se como o de maior sistemicidade, por conta de seus baixos valores de log Kow. Ademais, as estrobilurinas moveram-se mesosistemicamente, enquanto os triazóis translocaram-se de forma acropetal, porém, antes de atingir o xilema no interior do parênquima lacunoso, também precisou apresentar movimentação mesostêmica. Nas avaliações da PAL, observou-se pico de produção da enzima, em todos os tratamentos, às 72 horas após a inoculação da ferrugem, justificado por possível formação do apressório e haustório da *P. pachyrhizi*. O aumento da camada de cera nos tratamentos tebuconazol, piraclostrobina e picoxistrobina, em relação a testemunha, 30 dias após a pulverização dos produtos, evidencia a estímulo de mecanismos de defesa estrutural por meio das moléculas químicas a base de triazol e estrobilurina.

6. REFERÊNCIAS

- ANAND, T.; CHANDRASEKARAN, A.; KUTTALAM, S.; RAGUCHANDER, T.; PRAKASAM, V.; SAMIYAPPAN, R. Association of some plant defense enzyme activities with systemic resistance to early leaf blight and leaf spot induced in tomato plants by azoxystrobin and *Pseudomonas fluorescens*. **Journal of Plant Interactions**, 2007.
- ABBOTT, W.S. A method of computing the effectiveness of an insecticide. **Journal of Economic Entomology**, 18:265-266, 1925.
- AGROFIT. Disponível em: <
https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons>. Acesso em: 21 de abril de 2024.
- AHMADA, I.; KAMRANA, M.; ALIA, S.; BILEGJARGALC, B.; CAIA, T.; AHMADA, S.; MENGA, X.; SUA, W.; LIUA, T.; HAN, Q. Uniconazole application strategies to improve lignin biosynthesis, lodging resistance and production of maize in semiarid regions. **Field Crops Research** 222 66–77, 2018.
- ALVES, V. M.; JULIATTI, F. C. Fungicidas no manejo da ferrugem da soja, processos fisiológicos e produtividade da cultura. **Summa Phytopathologica.**, Botucatu, v. 44, n. 3, p. 245-251, 2018.

AMARO, A.C.E.; BARON, D.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D. Physiological effects of strobilurin and carboxamides on plants: an overview. **Acta Physiologiae Plantarum**, 42:4, 2020.

APROSOJA - Associação Brasileira de Produtores de Soja. Disponível em: < <https://aprosojabrasil.com.br/a-soja/> >. Acesso em: 01º de maio de 2024.

ARRUDA E SILVA, A. C. **Desempenho de adjuvantes na qualidade da aplicação e na retenção e translocação de fungicida na cultura da soja** (Tese). Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita de Filho”, Botucatu – SP. 2013.

BALARDIN, R. **Fungicidas sistêmicos: benzimidazóis, triazóis e estrobilurinas**. 2021. Disponível em: < <https://elevagro.com/blog/fungicidas-sistemicos/> >. Acesso em: 19 de abril de 2024.

BARBOSA-JUNIOR, M. P. **Management of coffee rust and brow eye spot using cultural and chemical control** (Tese). Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. 2020.

BARTLETT, D. W.; CLOUGH, J. M.; GODWIN, J. R.; HALL, A. A.; HAMER, M.; PARR-DOBRZANSKI, B. The strobilurin fungicides. **Pest Manag Sci** 58: 649-662. 2002.

BECKERMAN, J. Fungicide Mobility for Nursery, Greenhouse, and Landscape Professionals. In: Purdue Extension (Org.) **Disease Management Strategies**. 2008.

BERUSKI, G. C.; SENTELHAS, P. C.; PEREIRA, A. B.; CÂMARA, G. M. S.; JUNIOR, I. P. A.; SCHIEBELBEIN, L. M. Soybean Rust Epidemics as Affected by Weather Conditions in Brazil. **Journal of Agricultural Science**, Vol. 12, No. 1; 2020.

BEZERRA, A. R. G.; SEDIYAMA, T.; BORÉM, A.; SOARES, M. M. Importância Econômica. In: Silva, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; CÂMARA, T. (Org.). **Soja**. São Paulo – SP: Oficina de Textos, 2022.

BIEMELT, S.; KEETMAN, U.; ALBRECHT, G. Re-aeration following hypoxia or anoxia leads to activation of the antioxidative defense system in roots of wheat seedlings. **Plant Physiology**, 116, 651–658. 57. 1998.

BIZUNEH, G. K. The chemical diversity and biological activities of phytoalexins. **Advances in Traditional Medicine**. 2021.

BORGES, L. P.; AMORIM, V. A. Metabólitos Secundários De Plantas. **Revista Agrotecnologia**, v. 11, n. 1, 2020.

BOSCHIERO, B. N. **Subprodutos da soja: conheça os destinos e usos da soja brasileira**. Disponível em: < <https://agroadvance.com.br/blog-subprodutos-da-soja/> >. Acesso em: 01º de maio de 2024.

CARETO, S.; LINSALATA, V.; COLELLA, G.; MITA, G.; LATTANZIO, V. Carbon Fluxes between Primary Metabolism and Phenolic Pathway in Plant Tissues under Stress. **International Journal Of Molecular Sciences**. 2015.

CARVALHO, N. S.; RODRIGUES, E. B. dos S.; SANTANA, T. de S.; CANTANHEDE, L. A.; DE SOUSA, G. M.; DE SOUSA, R. A.; DA SILVA FILHO, F. M.; DA SILVA-MATOS, R. R. S. Capítulo 6 - Revisão: A Importância Da Soja Para O Agronegócio Brasileiro. In: DA SILVA-MATOS, R. R. S.; VIEIRA E SILVA, A. L.; VIEIRA NETO,

G. F. (Org.). **Fitotecnia, sistemas agrícolas ambientais e solo**. E-book: Atena Editora. 2023.

CERESINI, P. C.; SILVA, T. C.; VICENTINI, S. N. C.; LEITE JÚNIOR, R. P.; MOREIRA, S. I.; CASTRO-RÍOS, K.; GARCÉS-FIALLOS, F. R.; KRUG, L. D.; MOURA, S. S. DE; SILVA, A. G. DA; CUSTÓDIO, A. A. DE P.; MIO, L. L. M. DE; GASPAROTO, M. C. DE G.; PORTALANZA, D.; JESUS JÚNIOR, W. C. DE. Strategies for managing fungicide resistance in the Brazilian tropical agroecosystem: Safeguarding food safety, health, and the environmental quality. **Tropical Plant Pathology**. 2024.

COLPO, T. L. **Interferência de adjuvantes e horários de aplicação no espectro de gotas e no desempenho de fungicidas em soja** (Dissertação). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS. 2022.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento de safra brasileiro – soja: Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: < <https://www.conab.gov.br/> >. Acesso em: 9 abr. 2024.

CONSÓRCIO ANTIFERRUGEM. Dados 2023. Disponível em: < <http://www.consorcioantiferrugem.net/#/main> >. Acesso em: 10 abr. 2024.

CROWDY, S. H. Cap. 5 – Translocation. In: MARSH, R. W. **Systemic Fungicides**, 2^o Edition, Longman Group, 1977.

CULTIVAR – GRANDES CULTURAS. Explosão de Manchas. Ano XX, N^o 242, ISSN 1536-358X, Julho, 2019. Disponível em: < https://issuu.com/grupocultivar/docs/cultivar_242-site >. Acesso em: abril de 2024.

DESLANDES, J.A. Ferrugem da soja e de outras leguminosas causadas por *Phakopsora pachyrhizi* no Estado de Minas Gerais. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília. v. 4, p. 337-339, 1979.

DOSTER, M., & BOSTOCK, R. Quantification of lignin formation in almond bark in response to wounding and infection by *Phytophthora* species. **Phytopathology**, 78, 473–477. 1988.

EKATERINA V. BAIBAKOVA, E. V.; NEFEDJEVA, E. E.; SUSKA-MALAWSKA, M.; WILK, M.; SEVRIUKOVA, G. A.; ZHELTOBRIUKHOV, V. F. Modern Fungicides: Mechanisms of Action, Fungal Resistance and Phytotoxic Effects. **Annual Research & Review in Biology**. 2019.

EMBRAPA. Tecnologias de produção de soja região central do Brasil 2006. **Embrapa Soja**. 2005.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/soja/ferrugem#:~:text=Ferrugem%2Dasi%C3%A1tica%20da%20soja%20Ferrugem%2Dasi%C3%A1tica%20da%20soja&text=Segundo%20o%20Cons%C3%B3rcio%20Antiferrugem%2C%20essa,de%20produtividade%20se%20n%C3%A3o%20controlada.> >. Acesso em: 01^o de maio de 2024.

FAGAN, E. B; NETO, D. D.; RAFAEL, V.; FRANCO, R. B.; YEDA, M.P.; MASSIGNAM, L.F.; DE OLIVEIRA, R. F.; MARTINS, K. V. Efeito da aplicação de

piraclostrobina na taxa fotossintética, respiração, atividade da enzima nitrato redutase e produtividade de grãos de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, 771-777, 2010.

FAGAN, E. D.; CASAROLI, D. Análise temporal de variáveis fisiológicas da cultura da soja após a aplicação de estrobilurina. **Cultura Agrônômica** – V. 23, N. 02, 2014.

FARIAS, J. R. B.; ABDELNOOR, R. V.; GODOY, C. V. Risco do surgimento e do aumento de populações resistentes a fungicidas do fungo causador da Ferrugem-Asiática da soja. **Embrapa Soja**, Nota técnica, 2p., 2014.

FENG, Y.; HUANG, Y.; ZHAN, H.; BHATT, P.; CHEN, S. An Overview of Strobilurin Fungicide Degradation: Current Status and Future Perspective. **Frontiers in Microbiology**, Volume 11, Artigo 389, março de 2020.

FLETCHER, R. A.; GILLEY, A. Triazoles as Plant Growth Regulators and Stress Protectants. **Horticultural Reviews**. Volume 24. 2000.

FRAC - FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. Mutations associated with QoI-resistance. 2006.

FRAC - FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. Novas recomendações para o manejo de doenças em soja. 2023.

FRAC - FUNGICIDE RESISTANCE ACTION COMMITTEE. FRAC Code List©* 2024: Fungal control agents sorted by cross-resistance pattern and mode of action. 2024.

FRANCESCHI, V.T.; ALVES, K. S.; MAZARO, S. M.; GODOY, C. V.; DUARTE, H. S. S.; PONTE, E. M. D. A new standard area diagram set for assessment of severity of soybean rust improves accuracy of estimates and optimizes resource use. **Plant Pathology**. 2020.

FREI, M. Lignin: Characterization of a Multifaceted Crop Component. **The Scientific World Journal**. 2013.

FREITAS E SILVA, M.; REZENDE, W. S.; FERREIRA JÚNIOR, D. DE C.; BUENO, T. V.; AGOSTINHO, F. B.; BRITO, C. H. DE. Corn stalk integrity is improved by fungicide combinations containing carboxamide. **Ciência e Agrotecnologia**, 42(5):484-490, 2018.

GARCÉS-FIALLOS, F. R.; FORCELINI, C. A. Controle comparativo da ferrugem asiática da soja com fungicida triazol ou mistura de triazol + estrobilurina. **Biosciences**, v. 29, n. 4, p. 805-815, July/Aug. 2013.

GODOY, C. V.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; MEYER, M.C.; COSTAMILAN, L. M.; ADEGS, F.S. Boas práticas para o enfrentamento da ferrugem-asiática da soja. **Embrapa** - Comunicado Técnico 92, ISSN 2176-2899 Londrina, PR Agosto, 2017.

GOELLNER, K.; LOEHRER, M.; LANGEBACH, C.; CONRATH, U.; KOCH, E.; SCHAFFRATH, U. *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of Asian soybean rust. **Molecular plant pathology**, v. 11, n. 2, p. 169-177, 2010.

GODOY, C. V.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; MARCELINO-GUIMARÃES, F. C.; MEYER, M. C.; COSTAMILAN, L. M. Asian soybean rust in Brazil: past, present, and future. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.51, n.5, p.407-421, 2016.

GODOY, C.V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; LOPES, I. DE O. N.; TOMEN, A.; CARVALHO, A. G. DE.; MOCHKO, A. C. R.; DIAS, A. R.;

FORCELINI, C. A.; SCHIPANSKI, C. A.; CHAGAS, D. F.; ARAÚJO JÚNIOR, I. P.; GALDINO, J. V.; ROY, J. M. T.; ASCARI, J. P.; SANTOS, J. DOS; BONANI, J. C.; GRIGOLLI, J. F. J.; KUDLAWIEC, K.; BELUFI, L. M. DE R.; SILVA, L. H. C. P. DA; FANTIN, L. H.; SATO, L. N.; STEFANELO, M. S.; GOUSSAIN JÚNIOR, M. M.; GARBIATE, M. V.; SENGHER, M.; MÜLLER, M. A.; DEBORTOLI, M. P.; MARTINS, M. C.; TORMEN, N. R. Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2022/2023: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos. **Embrapa** – Circular Técnica 195. 2023.

GOTARDI, G. A. **Eficácia, movimento superficial e atividade sistêmica dos fungicidas triazóis, triazolintiona, estrobilurinas e carboxamidas isolados no controle da ferrugem da soja** (Tese). Universidade Estadual Paulista, Botucatu – SP. 2022.

HAWKINS, N. J.; BASS, C.; DIXON, A.; NEVE, P. The evolutionary origins of pesticide resistance. **Biological Reviews** 94,135–155, 2019.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTO, J. J. O agronegócio da soja nos contextos mundiais e brasileiros. **Embrapa Soja**, ISSN 2176-2937; n. 349, Londrina – PR, 2014.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soils. **Agricultural Experimental Station**. 1950.

IHARA - Iharabras S. A. Indústrias Químicas. **Fungicida Fusão EC**. Boletim técnico. Disponível em: <https://www.instaagro.com/media/attachment/file/f/u/fusao-bi.pdf>. 2024.

JAKL, M.; ZELJKOVI, S. V.; KOVAC, I. ZNÍKOVA, K. B.; DYTRTOV, J. J. Side effects of triazoles on treated crops. **Chemosphere**, 277 2021.

JULIATTI, F. C.; JULIATTI, B. C. M.; FIGUEIRÓ, A. de A. Resistência de fungos aos fungicidas na cultura da soja e do milho: evolução do problema no Brasil, aspectos moleculares e estratégias para o seu manejo correto e seguro. In: Núcleo de Estudos em Fitopatologia – NEFIT (Org.). **Avanços da fitopatologia no agronegócio**. Lavras – MG: NEFIT, p. 204, 2015.

JULIATTI, F. C.; AZEVEDO, L. A. S. de; JULIATTI, F. C. Strategies of Chemical Protection for Controlling Soybean Rust. **Intech**. 2017.

JULIATTI, F. C.; POLLONI, L. C.; DE MORAIS, T. P.; ZACARIAS, N. R. S.; SILVA, E. A.; JULIATTI, B. C. M. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* populations to dithiocarbamate, chloronitrile, triazole, strobilurin, and carboxamide fungicides. **Bioscience**. v. 33, n. 4, p. 933-943, July/Aug. 2017.

JULIATTI, B. C. M. **Biochemical, physiological and epidemiological characterization of soybean genotypes (*Glycine max*) with partial resistance against soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P.Sydow)** (Tese), Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. 2018.

KLITTICH, C. J. R.; RAY, S. L. Effects of physical properties on the translaminar activity of fungicides. **Pesticide Biochemistry and Physiology** 107, 351–359. 2013.

KLITTICH, C. J. R. Fungicide Mobility and the Influence of Physical Properties. In: Satchivi, *et al.* (Org.). **Retention, Uptake, and Translocation of Agrochemicals in Plants**. ACS Symposium Series; American Chemical Society: Washington, DC, 2014.

- KLOSOWSKI, A. C.; MIO, L. L. M. DE; MIESSNER, S.; RODRIGUES, R.; STAMMLER, G. Detection of the F129L mutation in the cytochrome b gene in *Phakopsora pachyrhizi*. **Pest Manag Sci**, 2015.
- LATTANZIO, V. Cap. 50 – Phenolic Compounds: Introduction. In: RAMAWAT, K. G.; MÉRILLON, J. M. (Eds.), **Natural Products**. 2013.
- LEE, J. H.; KIM, Y. C. Strobilurin fungicides activate plant defense against viral and bacterial infections and improve plant vigor. **Journal of Plant Diseases and Protection**. 2022.
- LI, H.; LIU, Y.; XUE, M.; WANG, X.; MIAO, W.; SUN, Q.; LIU, F.; UM, W. Variation in phytotoxicity of rice seedlings caused by differential accumulation of azoxystrobin and pyraclostrobin in leaves. **Plant Physiology and Biochemistry**, Volume 215, 2024.
- LIU, Q.; LUO, L.; ZHENG, L. Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**. 2018.
- MAREK, J. **Efeitos fisiológicos e metabólicos em tomateiro por estrobilurinas e carboxamidas** (Tese). Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava – PR. 2018.
- MARQUES, L. **Modo e mecanismo de ação de fungicidas triazóis e triazolinione**. Disponível em: < <https://elevagro.com/blog/modo-e-mecanismo-de-acao-dos-fungicidas-triazóis-e-triazolinione/> >. Acesso em: 24 de abril de 2024.
- MATSUO, E.; LOPES, E. A.; SEDIYAMA, T. Manejo de Doenças. In: Silva, F.; BORÉM, A.; SEDIYAMA, T.; CÂMARA, T. (Org.). **Soja**. São Paulo – SP: Oficina de Textos, 2022.
- MEHTA, P. M.; BHAVNARAYANA, K. Role of phenylalanine and tyrosine ammonia lyase enzymes in the pigmentation during development of brinjal fruit. **Proc. Indian Acad. Sci.** 90, 293–297, 1981.
- MORAN, R. Formulae for determination of chlorophyll as pigments extracted with Ndimethylformamide. **Plant Physiology**, Rockville, v.69, p.1376-1381, 1982.
- MORAN, R.; PORATH, D. Chlorophyll determination in intact tissues using N, NDimethylformamide. **Plant Physiology**, Rockville, v.65, p.478-479, 1980.
- OLIVEIRA, S. C. DE; CASTROAGUDÍN, V.L.; MACIEL, J. L. N.; PEREIRA, D. A. DOS S.; CERESINI, P. C. Resistência cruzada aos fungicidas IQo azoxistrobina e piraclostrobina no patógeno do brusone do trigo *Pyricularia oryzae* no Brasil. **Summa Phytopathol.**, Botucatu, v. 41, n. 4, p. 298-304, 2015.
- OLIVER, R. P.; BECKERMAN, J. L. 8 FUNGICIDE MOBILITY. In: OLIVER, R. P.; BECKERMAN, J. L. (Org.). **Fungicides in Practice**. 2022.
- PAULA, P. V. A. A. de. **Mistura de fungicidas sistêmicos com cúpricos e análise espaço temporal de doenças do cafeeiro** (Tese). Universidade Federal de Lavras, Lavras – MG. 2018.
- PERES, L. E. P. Metabolismo Secundário. **Esalq**. 2015.
- PÉREZ, C. D. P.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; ELMER, W. H.; PEREIRA, A. B.; GUIMARÃES, D. DA S. G.; MONTEIRO, A. C. A.; REZENDE, M. L. V. DE. Boron, zinc and manganese suppress rust on coffee plants grown in a nutrient solution. **Eur J Plant Pathol**, 156:727–738. 2020.

PESTICIDE PROPERTIS DATABASE – PPDB. Disponível em: < <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm> >. Acesso em: 01º/08/2024.

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A. Relação entre nutrição e as doenças de plantas: implicações práticas. In: MACHADO, A. K. F. M.; OGOSHI, C.; PERINA, F. J.; SILVA, G. M.; NEENTO, H. S.; COSTA, L. S. A. S.; ALENCAR, N. E.; MARTINS, S. J. TERRA, W. C.; ZANCAN, W.L.A. (ORG.). **Avanços na otimização do uso de defensivos agrícolas no manejo fitossanitário**. 1ed.São Carlos - SP: Suprema Gráfica e Editora, v. 1, p. 259-282, 2012.

POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A. Coffee plant diseases affected by nutritional balance. **Coffee Science**. 2023.

RAVI, I.; VARSHNEY, S.; SHARMA, G.; DWIVEDI, V.; BEHERA, K. K. Studies on Activation of Systemic Acquired Resistance (SAR) by Heterocyclic Compounds Having Azole Groups in *Vigna radiata* (L.) Wilczek. **Natulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca**. 2012.

REIS, E. M.; DEUNER, E.; ZANATTA, M. *In vivo* sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* to DMI and QoI fungicides. **Summa Phytopathol.**, Botucatu, v. 41, n. 1, p. 21-24, 2015.

REIS, E. M.; REIS, A. C.; CARMONA, M. A. **Manual de Fungicidas: Guia para o controle químico racional de doenças de plantas**. 8ª. ed. Editora Berthier, ISBN 978-85-7912-304-7, 259p., 2019.

RODRIGUES, E. F.; VIERO, R. M. **Controle da ferrugem asiática da soja por estrobilurinas isoladas ou em associação com triazóis/carboxamidas** (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS. 2014.

SANTOS, P. S. J. dos. **Estudo da sistemicidade e tenacidade de epoxiconazol, piraclostrobina e fluxapiroxade em plantas de soja e videira** (Tese). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba – SP. 2016.

SCHNEIDER, K. T.; VAN DE MORTEL, M.; BANCROFT, T. J.; BRAUN, E.; NETTLETON, D.; NELSON, R. T.; FREDERICK, R. D.; BAUM, T. J.; GRAHAM, M. A.; WHITHAM, S. A. Biphasic Gene Expression Changes Elicited by *Phakopsora pachyrhizi* in Soybean Correlate with Fungal Penetration and Haustoria Formation. **Plant Pathology**, 2011.

SCHMITZ, H. K.; MEDEIROS, C. A.; CRAIG, I. R.; STAMMLER, G. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* towards quinone-oxidase-inhibitors and demethylation-inhibitors, and corresponding resistance mechanisms. **Pest Manag Sci**, 70: 378–388, 2013.

SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. Tecnologia de Produção de Soja. **Embrapa Soja**, ISSN 2176-2902; n. 17, Londrina – PR, 2020.

SHANER, G.; FINNEY, R. E. The effect of nitrogen fertilization on the expression of slow mildewing resistance in Knox wheat. **Phytopathology**, v. 67, p. 1051-1056, 1977.

SILVA, L. P. **Síntese de novos derivados triazólicos e avaliação de suas atividades antifúngicas** (Dissertação), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – MG, 2019.

SILVA, E.; DA GRAÇA, J. P.; PORTO, C.; DO PRADO, R. M.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; MEYER, M. C.; NUNES, E. de O.; PILAU, E. J. Unraveling Asian Soybean Rust

metabolomics using mass spectrometry and Molecular Networking approach. **Scientific Reports – Nature Research**, 10:138, 2020.

SOARES, L.H.; FAGAN, E. B.; CASAROLI, D.; ANDRADE, D. M; DE; SOARES, A.L.; MARTINS, K.V.; ROCHA, F. J. DA. Aplicação de diferentes estrobilurinas na cultura da soja. **Revista da FZVA**. Uruguaiana, v.18, n. 1, p. 78-97. 2011.

SPANOS, G. A.; WROLSTAD, R. E. Influence of processing and storage on the phenolic composition of Thompson seedless grape juice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, 38(7), 1565–1571. 1990.

STEFANELLO, M. T.; MARQUES, L. N.; MADALOSSO, M. G.; BALARDIN, R. S. **Como se movem os fungicidas em tecidos foliares**. Disponível em: < <https://revistacultivar.com.br/artigos/como-se-movem-os-fungicidas-em-tecidos-foliares> >. Acesso em: 09/06/2024.

SYNGENTA. Informe Técnico Chegou Priori Xtra. São Paulo, **Setor Agro**, 2003.

SWEETS, L. E.; WRATHER, J. A.; WRIGHT, S. Soybean rust. **Agriculture MU Guide**, 2015.

TEICHER, H. **Fungicide Mode-of-Action: The LabCoat Guide to Pesticides & BioPesticides**. Disponível em: < <https://www.linkedin.com/pulse/fungicide-mode-of-action-labcoat-guide-pesticides-harry-teicher-phd/?trk=article-ssr-frontend-pulse-little-text-block> >. Acesso em: 09/06/2024.

TEIXEIRA, E. C.; MATSUMOTO, S. N.; SILVA, D. C. DA; PEREIRA, L. F.; VIANA, A. E. S.; ARANTES, A. DE M. Morphology of yellow passion fruit seedlings submitted to triazole induced growth inhibition. **Ciência e Agrotecnologia**, 43:e020319, 2019.

USDA. United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service, Production, Supply and Distribution. Disponível em: < <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/home> >. Acesso em: 9 abr. 2024.

YORINORI, J. T.; JUNIOR, J. N.; LAZZAROTTO, J. J. Ferrugem “asiática” da soja no Brasil: evolução, importância econômica e controle. **Embrapa Soja**, ISSN 1516-781 X; n 247, 2004.

WANG, C. J.; LIU, Z. Q. Foliar uptake of pesticides—present status and future challenge. **Pesticide Biochemistry and Physiology**. 2007.

WRUCK, D. S. M.; JUNIOR, E. U. R.; VERSARI, L. R. Eficácia de fungicidas no controle de doenças de final de ciclo e na produtividade de grãos de soja. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento – EMBRAPA**. 2023.

YOUNG, H. M.; GEORGE, S.; NARVÁEZ, D. F.; SRIVASTAVA, P.; SCHUERGER, A. C.; WRIGHT, D. L.; MAROIS, J. J. Effect of Solar Radiation on Severity of Soybean Rust. **The American Phytopathological Society**. 2012.

ZHANG, X.; LIU, C. Multifaceted Regulations of Gateway Enzyme Phenylalanine Ammonia-Lyase in the Biosynthesis of Phenylpropanoids. **Molecular Plant**. 2015.

ZUNTINI, B.; ALVAREZ, R. de C. F.; THEODORO, G. de F.; ZUFFO, A. M. Effect of adding fungicide to mixtures of triazoles and strobilurins in the control of downy mildew and Asian soybean rust. **Pesq. Agropec. Trop**. 2019.

ANEXO A – Tabelas

Tabela A – Experimento I: Análise de variância para área abaixo da curva de progresso de severidade da ferrugem asiática da soja:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	46971	15657	3558.106	3.78e-14 ***
Repetições	3	50	17	3.803	0.0519
Resíduo	9	40	4		
Total	15	47061			
CV(%)			233.7738		

Tabela B – Experimento I: Análise de variância para peso de parte aérea seca (PPAS):

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	1525.7	508.6	105.4	2.5e-07 ***
Repetições	3	8.7	2.9	0.6	0.631
Resíduo	9	43.4	4.8		
Total	15	1604.8			
CV(%)			14.19202		

Tabela C – Experimento I: Análise de variância do peso de raízes secas (PRS):

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	186.46	62.15	241.274	6.49e-09 ***
Repetições	3	0.49	0.16	0.639	0.609
Resíduo	9	2.32	0.26		
Total	15	189.27			
CV(%)			8.487343		

Tabela D – Experimento II: Análise de variância da severidade média da ferrugem asiática da soja nos terços superior, médio e inferior do folíolo central de soja.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	6403.4801	21.349434	198.4797	<0.001
Terços	2	33.0720	16.5360	1.5376	0.2299
Blocos	3	124.1470	41.3823	3.848	0.0182
Trat. X Ter.	6	101.3303	16.8884	1.5704	0.1869
Resíduo	33	354.8890	10.7542	-	-
Total	47	7004.9184			
CV(%)			26.4100		

Tabela E – Experimento III: Análise de variância da atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) às 0 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	674.1	224.70	14.948	0.000767 ***
Repetições	3	108.4	36.12	2.403	0.134962
Resíduo	9	135.3	15.03		

Total	15	917,8
CV(%)	22.96485	

Tabela F – Experimento III: Análise de variância da atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) às 24 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	45.24	15.079	6.422	0.0129 *
Repetições	3	12.45	4.149	1.767	0.2232
Resíduo	9	21.13	2.348		
Total	15	78.82			
CV(%)	15.83461				

Tabela G – Experimento III: Análise de variância da atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) às 48 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	293.9	97.976	2.3833	0.1370
Repetições	3	90.3	30.110	0.7324	0.5583
Resíduo	9	370	41.110		
Total	12	754.2			
CV(%)	33.76107				

Tabela H – Experimento III: Análise de variância da atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) às 72 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	4450	1483.3	37.12	2.13e-05 ***
Repetições	3	117	39.2	0.98	0.444
Resíduo	9	360	40.0		
Total	15	4927			
CV(%)	16.95673				

Tabela I – Experimento III: Análise de variância da atividade da enzima phenylalanine ammonia-lyase (PAL) às 96 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	355.8	118.58	6.281	0.0138*
Repetições	3	73.1	24.36	1.290	0.3359
Resíduo	9	169.9	18.88		
Total	15	598.8			
CV(%)	27.61609				

Tabela J – Experimento III: Análise de variância dos teores foliares de compostos fenólicos solúveis totais às 0 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.1312	0.04374	0.497	0.693
Repetições	3	0.1373	0.04576	0.520	0.679
Resíduo	9	0.7920	0.08800		
Total	15	1.0605			

CV(%)	4.469121
--------------	----------

Tabela K – Experimento III: Análise de variância dos teores foliares de compostos fenólicos solúveis totais às 24 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.0543	0.01811	0.282	0.837
Repetições	3	0.2237	0.07457	1.159	0.378
Resíduo	9	0.5788	0.06431		
Total	15	0.8568			
CV(%)			3.751607		

Tabela L – Experimento III: Análise de variância dos teores foliares de compostos fenólicos solúveis totais às 48 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.01230	0.004101	0.156	0.923
Repetições	3	0.04261	0.014202	0.541	0.666
Resíduo	9	0.23647	0.026274		
Total	15	0.29138			
CV(%)			2.451278		

Tabela M – Experimento III: Análise de variância dos teores foliares de compostos fenólicos solúveis totais às 72 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.08254	0.02751	1.705	0.235
Repetições	3	0.10654	0.03551	2.201	0.158
Resíduo	9	0.14520	0.01613		
Total	15	0.33428			
CV(%)			1.921485		

Tabela N – Experimento III: Análise de variância dos teores foliares de compostos fenólicos solúveis totais às 96 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.0377	0.01256	0.305	0.822
Repetições	3	0.0629	0.02096	0.508	0.686
Resíduo	9	0.3710	0.04122		
Total	15	0.4716			
CV(%)			3.029026		

Tabela O – Experimento III: Análise de variância dos teores de lignina solúvel às 0 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	40.52	13.505	3.018	0.0867 .
Repetições	3	3.60	1.202	0.268	0.8466
Resíduo	9	40.28	4.475		
Total	15	84.40			
CV(%)			15.11239		

Tabela P – Experimento III: Análise de variância dos teores de lignina solúvel às 24 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	23.89	7.963	1.354	0.3176
Repetições	3	52.25	17.418	2.961	0.0901 .
Resíduo	9	52.93	5.881		
Total	15	129.07			
CV(%)			16.17407		

Tabela Q – Experimento III: Análise de variância dos teores de lignina solúvel às 48 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	9.73	3.242	0.222	0.879
Repetições	3	24.06	8.019	0.548	0.662
Resíduo	9	131.69	14.633		
Total	15	165.48			
CV(%)			27.39256		

Tabela R – Experimento III: Análise de variância dos teores de lignina solúvel às 72 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	94.98	31.492	5.185	0.0236 *
Repetições	3	5.35	1.782	0.293	0.8293
Resíduo	9	54.66	6.074		
Total	15	154.99			
CV(%)			20.07597		

Tabela S – Experimento III: Análise de variância dos teores de lignina solúvel às 0 horas após a inoculação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	98.84	32.95	5.756	0.0177 *
Repetições	3	21.51	7.17	1.253	0.3474
Resíduo	9	51.51	5.72		
Total	15	171,86			
CV(%)			19.57825		

Tabela T – Experimento III: Análise de variância da avaliação de diâmetro de planta na 1º avaliação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.1599	0.0533	0.277	0.840
Repetições	3	1.0753	0.3584	1.866	0.206
Resíduo	9	1.7286	0.1921		
Total	15	2.9638			
CV(%)			9.682569		

Tabela U – Experimento III: Análise de variância da avaliação de diâmetro de planta na 2º avaliação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.1411	0.04702	0.177	0.909
Repetições	3	0.6661	0.22202	0.837	0.507
Resíduo	9	2.3882	0.26536		
Total	15	3.1954			
CV(%)			10.56405		

Tabela V – Experimento III: Análise de variância da avaliação de diâmetro de planta na 3ª avaliação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.6884	0.2295	1.310	0.330
Repetições	3	0.7546	0.2515	1.436	0.296
Resíduo	9	1.5762	0.1751		
Total	15	3.0192			
CV(%)			8.205673		

Tabela W – Experimento III: Análise de variância da avaliação de diâmetro de planta na 4ª avaliação.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.2673	0.0891	0.491	0.697
Repetições	3	1.4665	0.4888	2.692	0.109
Resíduo	9	1.6342	0.1816		
Total	15	3.368			
CV(%)			8.373819		

Tabela X – Experimento III: Análise de variância da avaliação de altura de planta na 1ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	69.23	23.078	1.873	0.205
Repetições	3	28.90	9.633	0.782	0.533
Resíduo	9	110.92	12.324		
Total	15	209.05			
CV(%)			9.300569		

Tabela Y – Experimento III: Análise de variância da avaliação de altura de planta na 2ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	63.79	21.264	1.141	0.384
Repetições	3	9.54	3.181	0.171	0.914
Resíduo	9	167.78	18.642		
Total	15	241.11			
CV(%)			9.629654		

Tabela Z – Experimento III: Análise de variância da avaliação de altura de planta na 3ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	124.6	41.52	1.808	0.216

Repetições	3	29.2	9.73	0.424	0.741
Resíduo	9	206.7	22.97		
Total	15	360.5			
CV(%)			9.449811		

Tabela AA – Experimento III: Análise de variância da avaliação de altura de planta na 4ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	100.81	33.60	1.061	0.413
Repetições	3	76.74	25.58	0.808	0.521
Resíduo	9	285.05	31.67		
Total	15	462.6			
CV(%)			10.91058		

Tabela AB – Experimento III: Análise de variância da avaliação de expansão foliar na 1ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	176.7	58.90	0.421	0.742
Repetições	3	22.5	7,51	0.054	0.983
Resíduo	9	1258.4	139.82		
Total	15	1457.6			
CV(%)			87.55037		

Tabela AC – Experimento III: Análise de variância da avaliação de expansão foliar na 2ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	866.6	288.9	1.423	0.299
Repetições	3	464.4	154.8	0.763	0.543
Resíduo	9	1826.3	202.9		
Total	15	3157.3			
CV(%)			33.35544		

Tabela AD – Experimento III: Análise de variância da avaliação de expansão foliar na 3ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	93.8	31.28	0.851	0.501
Repetições	3	93.1	31.05	0.844	0.503
Resíduo	9	331.0	36.78		
Total	15	517.9			
CV(%)			12.52449		

Tabela AE – Experimento III: Análise de variância da avaliação de expansão foliar na 4ª avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	100.67	33.56	1.539	0.271
Repetições	3	42.52	14.17	0.650	0.603
Resíduo	9	196.29	21.81		

Total	15	339,48
CV(%)	9.813118	

Tabela AF – Experimento III: Análise de variância da avaliação do teor de clorofila na 1º avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	5.132	1.7108	2.025	0.181
Repetições	3	4.662	1.5540	1.839	0.210
Resíduo	9	7.604	0.8449		
Total	15	17.398			
CV(%)	7.932093				

Tabela AG – Experimento III: Análise de variância da avaliação do teor de clorofila na 2º avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	4.419	1.4731	4.299	0.03852 *
Repetições	3	7.460	2.4867	7.257	0.00893 **
Resíduo	9	3.084	0.3427		
Total	15	14.963			
CV(%)	4.808929				

Tabela AH – Experimento III: Análise de variância da avaliação do teor de clorofila na 3º avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	0.920	0.3067	0.355	0.787
Repetições	3	3.965	1.3218	1.528	0.273
Resíduo	9	7.785	0.8650		
Total	15	12.67			
CV(%)	6.618175				

Tabela AI – Experimento III: Análise de variância da avaliação do teor de clorofila na 4º avaliação:

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	113.7	37.89	2.535	0.1223
Repetições	3	142.7	47.58	3.183	0.0774
Resíduo	9	134.5	14.95		
Total	15	390.9			
CV(%)	27.66179				

Tabela AJ – Experimento III: Análise de variância da avaliação do peso da planta seca.

FV	GL	SQ	QM	F	Pr(>F)
Tratamentos	3	35.23	11.74	0.605	0.628
Repetições	3	132.73	44.24	2.278	0.148
Resíduo	9	174.80	19.42		
Total	15	342,76			
CV(%)	22.68034				