

## Tolerância de linhagens de milho ao herbicida tembotrione

Tolerance of maize lines to the tembotrione herbicide

Tolerancia de líneas de maíz al herbicida tembotriona

Recebido: 07/07/2022 | Revisado: 25/07/2022 | Aceito: 02/08/2022 | Publicado: 11/08/2022

### Eliel Matheus Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6336-4715>  
Instituto Federal Goiano, Brasil  
E-mail: [eliel.matheus@hotmail.com](mailto:eliel.matheus@hotmail.com)

### Hyrandir Cabral de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9546-2539>  
Universidade Federal de Goiás, Brasil  
E-mail: [hyrandir@yahoo.com.br](mailto:hyrandir@yahoo.com.br)

### Frederico Rocha Rodrigues Alves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2540-4699>  
Universidade Federal de Goiás, Brasil  
E-mail: [fred\\_rra@ufg.br](mailto:fred_rra@ufg.br)

### Aniela Pilar Campos de Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5687-5928>  
Instituto Federal Goiano, Brasil  
E-mail: [aniela.pcdmelo@gmail.com](mailto:aniela.pcdmelo@gmail.com)

### Dalva Graciano Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9607-7878>  
Universidade Federal de Goiás, Brasil  
E-mail: [dalvagraciano@ufg.br](mailto:dalvagraciano@ufg.br)

### Cleiton Mateus Sousa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8616-4580>  
Instituto Federal Goiano, Brasil  
E-mail: [cleiton.sousa@ifgoiano.edu.br](mailto:cleiton.sousa@ifgoiano.edu.br)

### Resumo

As linhagens de milho, pelo seu elevado nível de homozigose, possuem comportamentos diferentes dos híbridos comerciais em relação à sensibilidade a herbicidas. O tembotrione, herbicida de pós-emergência, amplamente utilizado em campo de produção de híbridos comerciais de milho-doce, tem sido relatado como causador de efeitos fitotóxicos. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial fitotóxico do tembotrione, sobre seis linhagens de milho, aprofundando seus efeitos sobre aspectos morfológicos e de produção, com ênfase sobre o processo fotossintético. Para isso, um experimento foi implantado no município de Goianésia, região do Cerrado goiano, Brasil, no período seco do ano, utilizando-se de irrigação por aspersão convencional. O delineamento experimental foi blocos casualizados, disposto em parcelas subdivididas com dois fatores: seis linhagens de milho por quatro doses de tembotrione (0; 120; 240; e 480 mL ha<sup>-1</sup>). Verificou-se que não houve sintoma visual de toxicidade no genótipo 43NG34381L com a aplicação de 480 mL ha<sup>-1</sup>, mesmo sendo correspondente ao dobro daquela recomendada em bula, sendo a linhagem mais tolerante ao herbicida. As linhagens Z9999L, G55081L e 551CB, embora sensíveis ao tembotrione na dose de bula (240 mL ha<sup>-1</sup>), tiveram fitotoxicidade moderada aos 7 dias após aplicação (DAA), sem nenhum sintoma aos 14 e 21 DAA. As linhagens ZKQMR2357L e PGAG10051L foram as mais sensíveis a aplicação do herbicida tembotrione e mantiveram sintomas de toxidez persistentes ao longo do tempo, mesmo com a aplicação de 240 mL ha<sup>-1</sup>. A produtividade da linhagem ZKQMR2357L foi negativamente afetada pela toxicidade provocada pelo herbicida.

**Palavras-chave:** *Zea mays*; Plantas daninhas; Fitotoxicidade; Fotossíntese; Produtividade.

### Abstract

Maize inbred lines, due to their high level of homozygosity, have different behaviors from commercial hybrids in relation to herbicide sensitivity. Tembotrione, a post-emergence herbicide, widely used in the production of commercial corn hybrids, has been reported as causing phytotoxic effects. In this context, the objective of this work was to evaluate the phytotoxic potential of tembotrione, applied to six maize lines, assessing its effects over morphological and production aspects, with emphasis on photosynthesis. For this, an experiment was implemented in the municipality of Goianésia, in the Brazilian Cerrado, during the dry season, using conventional sprinkler irrigation. The experimental design was randomized blocks, arranged in split plots with two factors: six maize inbred lines by four doses of tembotrione (0; 120; 240; and 480 mL ha<sup>-1</sup>). It was verified that there were no visual symptoms of toxicity in the genotype 43NG34381L with the application of 480 mL ha<sup>-1</sup>, even though it corresponded to twice that

recommended in the label, being the inbred line more tolerant to the herbicide. The genotypes Z9999L, G55081L and 551CB, although sensitive to tembotrione at the label dose (240 mL ha<sup>-1</sup>), had moderate phytotoxicity at 7 days after application (DAA), without any symptoms at 14 and 21 DAA. The genotypes ZKQMR2357L and PGAG10051L were the most sensitive to the application of the herbicide tembotrione and maintained persistent symptoms of toxicity over time, even with the application of 240 mL ha<sup>-1</sup>. The yield of the ZKQMR2357L line was negatively affected by the toxicity caused by the herbicide.

**Keywords:** *Zea mays*; Weeds; Phytotoxicity; Photosynthesis; Productivity.

### Resumen

Las líneas de maíz, debido a su alto nivel de homocigosidad, tienen comportamientos diferentes a los híbridos comerciales en relación a la sensibilidad a los herbicidas. La tembotriona, un herbicida de post-emergencia, ampliamente utilizado en la producción de híbridos comerciales de maíz, ha sido reportado como causante de efectos fitotóxicos. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial fitotóxico de la tembotriona, aplicada a seis líneas de maíz, profundizando sus efectos sobre aspectos morfológicos y productivos, con énfasis sobre la fotosíntesis. Así se implementó un experimento en el municipio de Goianésia, región de cerrado de Goiás, Brasil, en el período seco del año, utilizando riego por aspersión convencional. El diseño experimental fue bloques al azar, dispuestos en parcelas divididas con dos factores: seis líneas de maíz por cuatro dosis del herbicida tembotriona (0; 120; 240; y 480 mL ha<sup>-1</sup>). Se encontró que no hubo síntomas visuales de toxicidad en la línea 43NG34381L con la aplicación de 480 mL ha<sup>-1</sup>, a pesar de que correspondió al doble de lo que es recomendado en el prospecto, siendo la cepa más tolerante al herbicida. Las líneas Z9999L, G55081L y 551CB, aunque sensibles a la tembotriona a la dosis recomendada (240 mL ha<sup>-1</sup>), presentaron fitotoxicidad moderada a los 7 días después de la aplicación (DDA), sin síntomas a los 14 y 21 DDA. Las líneas ZKQMR2357L y PGAG10051L fueron las más sensibles a la aplicación del herbicida tembotriona y mantuvieron síntomas persistentes de toxicidad al largo del tiempo, incluso con la aplicación de 240 mL ha<sup>-1</sup>. El rendimiento de la línea ZKQMR2357L fue afectado negativamente por la toxicidad provocada por el herbicida.

**Palabras claves:** *Zea mays*; Malas hierbas; Fitotoxicidad; Fotosíntesis; Productividad.

## 1. Introdução

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais cultivadas em todo mundo e é considerado o cereal mais importante no cenário econômico em função do seu emprego na alimentação humana e animal (Singh et al., 2022). Na safra de 2020/2021, a produção brasileira de milho foi superior a 100 milhões de toneladas cultivado em 17,493 milhões de hectares, sendo exportados 29,5 milhões de toneladas (FAO, 2021; CONAB, 2021).

Dentre os fatores bióticos que interferem na cultura do milho, as plantas daninhas causam perdas significativas por possuir elevada capacidade de adaptação a diversos ambientes e situações de estresses, interferindo em qualquer estágio do desenvolvimento da cultura. O controle das plantas daninhas pode ser preventivo, mecânico, cultural, químico e biológico. O método químico por meios dos herbicidas é o mais utilizado nas lavouras de milho, visto que apresenta rápida ação e boa eficácia sobre as plantas daninhas (Şerban et al., 2021), sendo utilizados como método de controle em aproximadamente 70% da área cultivada com milho em todo o território brasileiro (Pasini et al., 2017).

Dentre os herbicidas com ação gramínicida registrados para a cultura do milho, destaca-se o princípio ativo tembotrione para uso em pós-emergência. Pertencente ao grupo químico das tricetonas inibidores da enzima 4-hidroxifenilpiruvato dioxigenase (HPPD), indicados ao controle de um amplo espectro de plantas daninhas, sejam eudicotiledôneas ou monocotiledôneas (Williams & Pataky, 2010) (ABIT et al., 2009), tendo boa compatibilidade de mistura em tanque de pulverizadores com outros herbicidas, assim como maior segurança para a cultura (Bollman et al., 2008; Walsh et al., 2012). O tembotrione é móvel tanto no floema quanto no xilema, onde a mobilidade via floema é fundamental na distribuição foliar, raízes e regiões de crescimento, acumulando-se nos cloroplastos (Van Almsick et al., 2009). O tembotrione pode ser aplicado na cultura do milho em todos os estádios fenológicos (Mançaneres et al., 2019).

Compreender o controle genético de características específicas e desejadas em culturas agrícolas é essencial para selecionar genótipos de interesse e definir estratégias de melhoramento (Freitas et al., 2013). Os atributos genéticos de uma espécie são geralmente controlados por um ou vários genes. Nesse caso, o controle genético da tolerância a diferentes

mecanismos de ação de herbicidas comerciais tem sido caracterizado como genes com dominância completa ou incompleta (Christoffoleti & Ovejero, 2008). De maneira geral, os híbridos comerciais de milho são tolerantes aos principais herbicidas registrados para a cultura, incluindo o tembotrione (Karam & Da Silva, 2009). No entanto, em campos de produção que visam obter sementes de linhagens puras que resultem no futuro em híbridos comerciais de milho, tem-se observado o aparecimento de sintomas de fitotoxicidade à aplicação do herbicida tembotrione, como o branqueamento das folhas, redução do crescimento e até mesmo a interferência no processo reprodutivo das plantas (Schuelter et al., 2018).

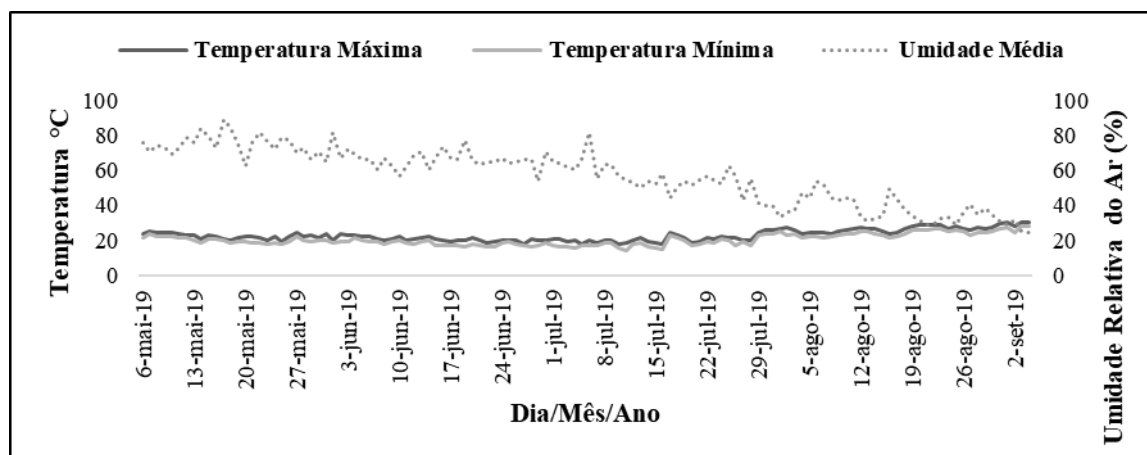
Embora existam muitos estudos com milhos híbridos cultivados para diferentes finalidades, são poucos os estudos específicos para tolerância de linhagens puras de milho ao uso do herbicida tembotrione para o controle de plantas daninhas em campos de produção de sementes comerciais. Diante disso, este estudo tem como objetivo avaliar a tolerância de linhagens de milho irrigado ao herbicida tembotrione nas condições edafoclimáticas do Cerrado brasileiro.

## 2. Metodologia

### 2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi implantado no período entre maio e setembro de 2019, no município de Goianésia/GO (15°18'00.87''S, 49°05'04.88''W) em altitude de 649 metros. O clima do local, segundo a classificação de Koppen, é do tipo Aw clima de savana ou clima tropical de estações úmida e seca, de inverno seco e verão chuvoso, com média pluvial anual de 1.502 mm. Observa-se na Figura 1 os dados de temperatura máxima, média e mínima e umidade relativa do ar da área experimental durante o período de cultivo das plantas.

**Figura 1.** Temperatura máxima, média e mínima e umidade relativa do ar da estação meteorológica localizada no município de Goianésia, GO.



Fonte: INMET (2019).

A Tabela 1 contém os dados de temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar no dia da aplicação do herbicida.

**Tabela 1.** Dados climatológicos no dia da aplicação experimental do herbicida em Goianésia, GO, 2019.

Temperatura máxima (°C)	Temperatura Média (°C)	Temperatura Mínima (°C)	Velocidade do vento m/s	UR (%)
26,50	22,40	24,45	2,52	73,70

Fonte: INMET (2019).

As características químicas e físicas na camada de 0-20 cm do solo (latossolo vermelho franco argiloso) se encontram na Tabela 2.

**Tabela 2.** Características químicas e físicas do solo (0-20 cm) da área experimental, Goianésia, GO, 2019.

pH	MO	Ca	Mg	Al	H+Al	K	CTC	P	V	Textura (g kg <sup>-1</sup> )		
CaCl <sub>2</sub>	g dm <sup>-3</sup>	-----cmol dm <sup>-3</sup> -----					mg dm <sup>3</sup>	%	Areia	Silte	Argila	
5,3	21,51	3,23	1,73	0,0	2,75	90,0	6,22	19,4	65	221	209	570

Fonte: Autoria própria.

No ambiente de cultivo foi instalado um termo-higrômetro para monitoramento de temperatura e umidade, mínima e máxima, com leituras às 12 h e um pluviômetro para quantificar a precipitação. Em um tanque de evaporação de água foram feitas leituras diariamente às 12 h com o auxílio de uma régua graduada fixa na borda do tanque. As irrigações foram feitas com turno de rega fixo de três dias, de acordo com reposição hídrica da evaporação do tanque Classe A, seguindo protocolo descrito em Oliveira et al. (2020).

## 2.2 Caracterização das linhagens

Os seis genótipos em estudo, são linhagens de milho com elevado nível de homozigose, caracterizando uniformidade genética. São originadas do programa de desenvolvimento de híbridos de milho e uso de técnicas de melhoramento de plantas, codificados como L1: Z9999L, L2: ZKQMR3257L, L3: 551CB, L4: PGAG10051L, L5: G55081L, L6: N34G34381L, escolhidas por integrarem cruzamentos pré-definidos para a produção de híbridos comerciais em empresas que atuam no desenvolvimento de híbridos na região na qual foi desenvolvido o experimento.

As linhagens G55081L, PGAG10051L e N34G34381L possui arquiteturas de folhas semiereta, boa tolerante a doenças, bom enraizamento, boa estabilidade produtiva e ciclo tardio. As linhagens ZKQMR3257L e Z9999L possui arquitetura de folhas semiereta, tolerância moderada a doenças, bom enraizamento, baixa estabilidade de produtiva e ciclo precoce. Já a linhagem 551CB se mostra altamente susceptível a doenças, enraizamento ruim, ciclo hiper precoce e bom potencial produtivo. Todos os genótipos têm registro nacional de cultivares no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (RNC, 2022).

## 2.3 Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, disposto em parcelas subdivididas com dois fatores (Zimmerman, 2014). O primeiro fator correspondeu às seis linhagens de milho (Z9999L, ZKQMR3257L, 551CB, PGAG10051L, G55081L, N34G34381L) e o segundo fator às doses de tembotrione (0; 120; 240; e 480 mL ha<sup>-1</sup>), com quatro repetições. O tembotrione é o herbicida 2-[2-chloro-4-(methylsulfonyl)-3-[(2,2,2-trifluoroethoxy)methyl]-benzoyl]-1,3-cyclohexanedione.

Os quatro blocos experimentais foram espaçados entre si em 1 m, contendo, cada um 12 m de comprimento. Cada bloco era constituído de todos os tratamentos, cada um contendo quatro linhas de plantas cultivadas, espaçadas em 0,70 m entre linhas e 2 m de comprimento. Cada parcela (tratamento) estava distanciada entre si em 1m. Para as avaliações foram consideradas apenas as duas linhas centrais de cada parcela, desprezando-se todas as extremidades.

As linhagens de milho utilizados foram disponibilizados pela empresa Limagrain Brasil S.A. A aplicação das doses de tembotrione foi realizada de forma transversal à linha de plantio, utilizando-se um pulverizador costal pressurizado com tanque de CO<sub>2</sub> (Herbicat®, Brasil). O pulverizador contém barra com quatro bicos tipo leque com anti-gotejo, espaçados a 0,5 m, e pontas modelo 110-02 (Magno Jet®), com faixa aplicada de 2 metros. O equipamento foi calibrado para o volume de calda de 120 L ha<sup>-1</sup>, com pressão de 1,5 Kgf de acordo com o manômetro da barra. A velocidade foi de 4,5 km h<sup>-1</sup>, e o tempo para percorrer cada tratamento foi de aproximadamente três segundos.

As aplicações foram realizadas no dia 25 de maio de 2019 no estádio fenológico V3, iniciando-se às 17 h, em velocidade constante e em condições ambientais favoráveis de velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar (Tabela 1), seguindo recomendações de aplicação para o controle de plantas daninhas em campos de produção de semente.

## 2.4 Análise de fitotoxicidade

Em campos de produção, é comum o uso de parâmetros morfológicos que evidenciem a toxicidades das plantas ao uso de herbicidas baseadas nos critérios estabelecidos por Frans et al. (1986). As análises de fitotoxicidade dos tratamentos foram realizadas aos 7, 14 e 21 dias após aplicação (DAA) com base nos sintomas visuais de fitotoxicidade, onde as percentagens variam de 0 (sem sintomas) a 100% (morte da planta), de acordo com a escala de Frans et al. (1986), conforme o Quadro 1.

**Quadro 1.** Escala de fitotoxicidade de plantas, indicada por Frans et al. (1986), em função do uso de herbicidas.

Nota (%)	Descrição das Categorias	Descrição detalhada da fitotoxicidade	Status para uso
0	Sem efeito	Nenhuma injúria observada	Liberado
10	Efeito leve	Injúria leve, pouquíssima descoloração ou atrofia, quase imperceptíveis	Liberado
20	Efeito leve	Injúria leve, alguma descoloração ou atrofia	Liberado
30	Efeito moderado	Injúria moderada e não duradoura	Liberado com restrição
40	Efeito moderado	Injúria moderada, porém, com recuperação até 21 dias	Liberado com restrição
50	Efeito acentuado	Injúria acentuada, baixa probabilidade de recuperação após 21 dias	Decisão Gerencial
60	Efeito acentuado	Injúria acentuada com redução de Stand	Cancelado
70	Efeito acentuado	Injúria acentuada, sem recuperação até 21 dias	Cancelado
80	Efeito Severo	Injúria severa, plantas próximas da destruição - poucas plantas sobrevivem	Cancelado
90	Efeito Severo	Injúria severa, raramente restam algumas plantas	Cancelado
100	Efeito Severo	Efeito total, destruição completa da parcela	Cancelado

Fonte: Autoria própria.

## 2.5 Análises fisiológicas de trocas gasosas e fluorescência da clorofila

No intuito de se avaliar os possíveis efeitos fitotóxicos causados nas plantas pela aplicação do tembotrione, assim como a capacidade de recuperação das plantas ao longo do tempo, as avaliações foram realizadas aos 0 (anterior à aplicação do

herbicida), 7, 14 e 21 dias após a aplicação do herbicida. Considerando os potenciais efeitos previamente relatados dos herbicidas do grupo das tricetonas sobre as plantas, além das variáveis visuais, a análise de variáveis fotossintéticas quanto aos potenciais fotoquímicos e de trocas gasosas evidenciam consequências fisiológicas importantes ao metabolismo primário das plantas, assim como análise de produtividade evidencia a resiliência produtiva das plantas em função de estresses pretéritos. As avaliações fisiológicas ocorreram no período da manhã (entre 8 h e 10 h), realizadas na folha do 2º ou 3º nó da base para o ápice, utilizando-se um analisador de gases infra-vermelho modelo LI-COR 6400XTR (Licor®, Nebraska, EUA) com temperatura do bloco de 24 °C e densidade de fluxo de fótons igual a 1000  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . As variáveis analisadas foram as taxas de fotossíntese líquida ( $A$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), de transpiração ( $E$ ,  $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), sendo as leituras realizadas após estabilização dos dados. A eficiência quântica potencial do PSII (Fv/Fm) foi avaliada no período da manhã, entre 10h e 11h, avaliada na mesma folha onde avaliou-se as trocas gasosas, utilizando-se um fluorômetro modelo Hansatech PEA MK2, Kings Lynn, England. A região das folhas ao serem analisadas foram submetidas a 20 minutos de escuro antes da análise, por meio de grampos adaptáveis à câmara do fluorômetro. Foi utilizado pulso de luz saturante de 2500  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  com duração de 5 segundos. Analisaram-se três folhas, sendo uma folha de cada planta em cada parcela.

## 2.6 Avaliação de produtividade

Para dados de produção de grãos, foram colhidas 20 espigas de cada parcela. As espigas foram levadas ao laboratório de análise de sementes da empresa Limagrain Brasil S.A. para medir o grau de umidade, utilizando-se um medidor de umidade de grãos CA50. A colheita foi realizada manualmente com 135 dias após a emergência (DAE), correspondente ao estágio posterior à maturação fisiológica, R6, momento em que se observou um teor de água nos grãos de 30 a 32%. Foram colhidas 20 espigas sequenciais das duas linhas centrais de cada parcela e secadas em estufa até atingirem o grau de umidade de 12% da base úmida. Em seguida foi realizada a contagem de grãos por espiga de cada parcela, realizada a pesagem das espigas e processada a estimativa de produtividade ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

## 3. Resultados

Independentemente das doses e do período de avaliação, não foram observados sintomas visuais de clorose no genótipo 43NG34381L, diferentemente das demais linhagens, em que a observação dos sintomas ocorreu nas plantas tratadas submetidas a maior dosagem, cujo efeito negativo foi diminuindo na medida em que se passavam os dias (Quadro 2). As linhagens ZKQMR2357L e o PGAG10051L foram sensíveis não somente à maior dosagem, como a dosagens mais baixas e com prolongado efeito negativo ao longo dos dias após a aplicação do herbicida. Para os genótipos Z9999L, 551CB e G55081L, foram observados sintomas somente aos 7 DAA na dose 480  $\text{mL ha}^{-1}$ , sendo que as plantas já haviam se recuperado nas demais avaliações de 14 e 21 DAA (dias após a aplicação do herbicida).

**Quadro 2.** Nota visual de fitotoxicidade mais frequente entre indivíduos analisados ( $n = 4$ ) para diferentes concentrações de tembotrione.

Linhagem	Dias após aplicação	Dose de tembotrione ( $\text{mL ha}^{-1}$ )			
		0	120	240	480
Z9999L	7	0	0	0	10
	14	0	0	0	0
	21	0	0	0	0
ZKQMR2357L	7	0	10	30	70
	14	0	10	30	50
	21	0	0	10	20
551CB	7	0	0	0	10
	14	0	0	0	0
	21	0	0	0	0
PGAG10051L	7	0	10	30	50
	14	0	10	30	50
	21	0	0	10	30
G55081L	7	0	0	0	10
	14	0	0	0	0
	21	0	0	0	0
43NG34381L	7	0	0	0	0
	14	0	0	0	0
	21	0	0	0	0

Fonte: Autoria própria.

Verificou-se que as trocas gasosas: fotossíntese líquida ( $A$ ), condutância estomática ( $gs$ ), transpiração ( $E$ ) e razão  $F_v/F_m$  para linhagem Z9999L não foram afetadas conforme o aumento da concentração das doses de tembotrione. Na linhagem 551CB observou-se efeito apenas quanto a redução de  $E$  na dose  $240 \text{ mL ha}^{-1}$ , superado ao longo dos dias (Quadro 3).

**Quadro 3.** Parâmetros fisiológicos avaliados para diferentes linhagens de milho sob diferentes concentrações de tembotrione ao longo de 21 dias após a aplicação. Dados indicam média  $\pm$  desvio padrão (n = 12). Valores em negrito indicam efeito significativo da concentração de tembotrione em relação ao controle (dose zero) em dias específicos de avaliação (ANOVA seguida do teste de Dunnett,  $\alpha = 0,05$ ).

Linhagem	Variável analisada	Dias após aplicação	Dose de tembotrione (mL ha <sup>-1</sup> )			
			0	120	240	480
Z9999L	A	7	19,97 $\pm$ 6,61	21,94 $\pm$ 6,51	19,15 $\pm$ 8,39	16,12 $\pm$ 6,32
		14	18,04 $\pm$ 6,37	15,27 $\pm$ 2,84	15,89 $\pm$ 3,87	18,34 $\pm$ 5,7
		21	13,46 $\pm$ 3,14	17,45 $\pm$ 6,82	15,84 $\pm$ 4,45	13,37 $\pm$ 6,47
	gs	7	0,23 $\pm$ 0,1	0,25 $\pm$ 0,07	0,22 $\pm$ 0,1	0,18 $\pm$ 0,08
		14	0,27 $\pm$ 0,14	0,2 $\pm$ 0,05	0,26 $\pm$ 0,06	0,3 $\pm$ 0,13
		21	0,2 $\pm$ 0,04	0,24 $\pm$ 0,11	0,2 $\pm$ 0,07	0,18 $\pm$ 0,1
	E	7	5,81 $\pm$ 1,81	6,62 $\pm$ 1,49	5,51 $\pm$ 1,9	5,03 $\pm$ 1,57
		14	4,6 $\pm$ 0,98	4,08 $\pm$ 0,91	5 $\pm$ 1,29	5,14 $\pm$ 1,26
		21	4,99 $\pm$ 0,9	5,35 $\pm$ 1,49	5,05 $\pm$ 1,54	4,37 $\pm$ 1,83
	Fv/Fm	7	0,75 $\pm$ 0,04	0,74 $\pm$ 0,06	0,77 $\pm$ 0,03	0,73 $\pm$ 0,08
		14	0,77 $\pm$ 0,03	0,76 $\pm$ 0,03	0,77 $\pm$ 0,04	0,77 $\pm$ 0,03
		21	0,76 $\pm$ 0,02	0,76 $\pm$ 0,03	0,77 $\pm$ 0,02	0,77 $\pm$ 0,08
ZKQMR2357L	A	7	20,97 $\pm$ 6,71	18,76 $\pm$ 8,14	<b>6,87 <math>\pm</math> 5,47</b>	<b>0,28 <math>\pm</math> 2,7</b>
		14	23,9 $\pm$ 3,04	19,72 $\pm$ 3,48	23,47 $\pm$ 4,8	<b>5,35 <math>\pm</math> 5,16</b>
		21	23,12 $\pm$ 3,41	21,1 $\pm$ 5,63	18,24 $\pm$ 6,81	<b>12,49 <math>\pm</math> 3,19</b>
	gs	7	0,27 $\pm$ 0,13	0,24 $\pm$ 0,14	<b>0,14 <math>\pm</math> 0,09</b>	<b>0,05 <math>\pm</math> 0,03</b>
		14	0,37 $\pm$ 0,07	<b>0,26 <math>\pm</math> 0,08</b>	0,34 $\pm$ 0,08	0,14 $\pm$ 0,05
		21	0,33 $\pm$ 0,1	0,31 $\pm$ 0,11	0,28 $\pm$ 0,13	<b>0,30 <math>\pm</math> 0,06</b>
	E	7	6,47 $\pm$ 1,83	5,89 $\pm$ 1,93	<b>3,14 <math>\pm</math> 1,09</b>	<b>1,74 <math>\pm</math> 0,55</b>
		14	5,98 $\pm$ 1,14	4,78 $\pm$ 0,98	5,65 $\pm$ 1	<b>2,99 <math>\pm</math> 1,02</b>
		21	6,75 $\pm$ 1,63	6,47 $\pm$ 1,01	<b>4,85 <math>\pm</math> 0,37</b>	<b>5,47 <math>\pm</math> 1,4</b>
	Fv/Fm	7	0,76 $\pm$ 0,02	0,76 $\pm$ 0,03	0,73 $\pm$ 0,04	<b>0,53 <math>\pm</math> 0,15</b>
		14	0,76 $\pm$ 0,03	0,75 $\pm$ 0,04	0,77 $\pm$ 0,03	<b>0,56 <math>\pm</math> 0,15</b>
		21	0,73 $\pm$ 0,04	0,74 $\pm$ 0,04	0,74 $\pm$ 0,04	0,68 $\pm$ 0,11
551CB	A	7	16,68 $\pm$ 5,94	17,2 $\pm$ 5,1	13,78 $\pm$ 5,31	16,87 $\pm$ 7,23
		14	19,1 $\pm$ 4,26	18,58 $\pm$ 3,88	18,81 $\pm$ 4,84	18,11 $\pm$ 4,6
		21	15,03 $\pm$ 4,74	14,29 $\pm$ 4,49	14,8 $\pm$ 4,37	15,33 $\pm$ 4,09
	gs	7	0,23 $\pm$ 0,08	0,21 $\pm$ 0,07	0,15 $\pm$ 0,09	0,21 $\pm$ 0,1
		14	0,32 $\pm$ 0,06	0,33 $\pm$ 0,09	0,32 $\pm$ 0,1	0,31 $\pm$ 0,12
		21	0,17 $\pm$ 0,07	0,18 $\pm$ 0,09	0,19 $\pm$ 0,04	0,2 $\pm$ 0,08
	E	7	5,74 $\pm$ 1,55	5,11 $\pm$ 0,61	<b>4,4 <math>\pm</math> 1,31</b>	5,2 $\pm$ 1,03
		14	5,37 $\pm$ 0,79	5,83 $\pm$ 1,54	5,54 $\pm$ 0,92	5,39 $\pm$ 1,71
		21	5,01 $\pm$ 1,56	5,11 $\pm$ 1,81	5,15 $\pm$ 0,6	5,09 $\pm$ 2
	Fv/Fm	7	0,69 $\pm$ 0,05	0,7 $\pm$ 0,04	0,7 $\pm$ 0,05	0,71 $\pm$ 0,05



Linhagem	Variável analisada	Dias após aplicação	Dose de tembotrione (mL ha <sup>-1</sup> )				
			0	120	240	480	
PGAG10051L		14	0,71 ± 0,04	0,71 ± 0,05	0,67 ± 0,07	0,7 ± 0,04	
		21	0,67 ± 0,07	0,68 ± 0,08	0,71 ± 0,03	0,64 ± 0,06	
	A	7	14,32 ± 6,51	13,57 ± 4,76	11,32 ± 2,24	<b>5,42 ± 2,34</b>	
		14	16,88 ± 4,38	16,11 ± 5,32	13,64 ± 4,66	<b>9,86 ± 1,8</b>	
		21	13,67 ± 4,31	16,87 ± 4,77	11,49 ± 4,46	<b>7,83 ± 2,3</b>	
	gs	7	0,22 ± 0,14	0,15 ± 0,04	0,17 ± 0,06	<b>0,11 ± 0,04</b>	
		14	0,31 ± 0,09	0,27 ± 0,11	<b>0,22 ± 0,09</b>	<b>0,21 ± 0,06</b>	
		21	0,15 ± 0,05	<b>0,24 ± 0,08</b>	0,21 ± 0,1	0,13 ± 0,03	
	E	7	5,1 ± 1,87	4,41 ± 0,8	4,57 ± 1,21	<b>3,13 ± 0,8</b>	
		14	5,55 ± 1,31	5,1 ± 1,78	4,81 ± 1,82	4,33 ± 1,43	
		21	4,65 ± 1,85	5,98 ± 1,74	5,31 ± 1,86	4,25 ± 0,72	
	Fv/Fm	7	0,76 ± 0,03	0,74 ± 0,03	0,72 ± 0,05	<b>0,56 ± 0,11</b>	
		14	0,77 ± 0,04	0,77 ± 0,03	0,77 ± 0,03	0,71 ± 0,04	
		21	0,73 ± 0,08	<b>0,66 ± 0,11</b>	0,73 ± 0,03	0,69 ± 0,05	
	G55081L	A	7	16,07 ± 2,92	<b>22,53 ± 6,9</b>	20,98 ± 3,8	19,94 ± 6,75
			14	18,36 ± 4,42	20,18 ± 5,88	14,98 ± 4,59	18,95 ± 6,29
			21	15,49 ± 4,44	17,18 ± 4,91	14,21 ± 5,8	16,16 ± 5,67
		gs	7	0,13 ± 0,05	0,22 ± 0,07	0,21 ± 0,07	0,18 ± 0,1
14			0,27 ± 0,09	0,29 ± 0,12	0,2 ± 0,06	0,28 ± 0,11	
21			0,19 ± 0,09	0,22 ± 0,08	0,18 ± 0,09	0,23 ± 0,13	
E		7	4,76 ± 0,79	<b>6,76 ± 2,19</b>	6,11 ± 1,04	5,55 ± 2,49	
		14	5,71 ± 1,1	5,91 ± 1,25	4,97 ± 0,91	5,9 ± 1,37	
		21	5,5 ± 1,21	6,02 ± 1,56	5,11 ± 1,63	5,82 ± 1,89	
Fv/Fm		7	0,78 ± 0,02	0,78 ± 0,01	0,79 ± 0,01	0,77 ± 0,03	
		14	0,76 ± 0,03	<b>0,79 ± 0,03</b>	<b>0,79 ± 0,03</b>	0,77 ± 0,04	
		21	0,76 ± 0,03	0,76 ± 0,02	0,77 ± 0,02	0,78 ± 0,02	
43NG34381L	A	7	17,38 ± 6,53	<b>11,05 ± 2,73</b>	14,62 ± 5,16	16,85 ± 5,09	
		14	15,3 ± 4,87	16,48 ± 4,94	15,86 ± 4,81	18,42 ± 3,74	
		21	18,08 ± 4,32	<b>13,45 ± 5,63</b>	<b>11,89 ± 4,04</b>	15,54 ± 0,6	
	gs	7	0,22 ± 0,11	0,15 ± 0,06	<b>0,14 ± 0,05</b>	0,19 ± 0,08	
		14	0,23 ± 0,07	0,26 ± 0,08	0,26 ± 0,04	0,29 ± 0,07	
		21	0,22 ± 0,07	0,19 ± 0,11	<b>0,14 ± 0,06</b>	0,19 ± 0,06	
	E	7	5,58 ± 1,83	4,68 ± 1,41	4,99 ± 1,08	5,28 ± 1,5	
		14	5,29 ± 0,99	5,58 ± 1,15	5,77 ± 0,47	6,12 ± 1,27	
		21	5,75 ± 1,17	4,91 ± 1,97	<b>4,17 ± 1,02</b>	5,05 ± 1,01	
	Fv/Fm	7	0,76 ± 0,03	0,76 ± 0,04	0,77 ± 0,02	0,77 ± 0,03	
		14	0,75 ± 0,05	0,76 ± 0,04	0,77 ± 0,04	<b>0,79 ± 0,02</b>	

Linhagem	Variável analisada	Dias após aplicação	Dose de tembotrione (mL ha <sup>-1</sup> )			
			0	120	240	480
		21	0,74 ± 0,05	0,76 ± 0,01	0,74 ± 0,04	0,73 ± 0,05

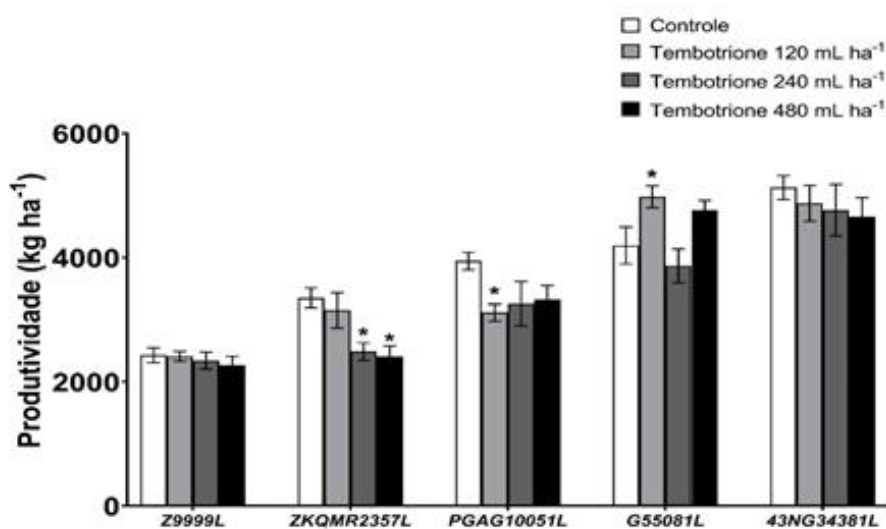
Fonte: Autorial própria.

Para as linhagens ZKQMR2557L e PGAG10051L, observou-se que quanto maior a dosagem do tembotrione, maior era a influência negativa do herbicida sobre *A*, *gs*, *E* e Fv/Fm, cujo efeito foi aliviado com o passar do tempo.

Avaliando as linhagens G55081L e 43NG34381L, observa-se pontuais nas trocas gasosas e Fv/Fm. A linhagem G55081L teve maior *A* e *E* aos 7 DAA na dose 120 mL ha<sup>-1</sup> e maior Fv/Fm para as dosagens 120 e 240 mL ha<sup>-1</sup> apenas ao 14 DAA (Quadro 3). Já a linhagem 43NG34381L teve menor desempenho de *A* aos 7 e 21 DAA na dose 120 mL ha<sup>-1</sup>; na dose de 240 mL ha<sup>-1</sup> observou-se menor *A* aos 21 DAA, *gs* aos 7 e 21 DAA e *E* aos 21 DAA; para Fv/Fm observou-se efeito de aumento apenas na dose de 480 mL ha<sup>-1</sup> aos 14 DAA.

Na Figura 2 observa-se os resultados de produtividade (kg ha<sup>-1</sup>) em função da aplicação do herbicida tembotrione.

**Figura 2.** Estimativa de produtividade das linhagens puras de milho submetidas a diferentes concentrações de tembotrione. Asteriscos indicam efeito significativo da concentração de tembotrione sobre a produtividade em relação ao controle (ANOVA seguida do teste de Dunnett,  $\alpha = 0,05$ ).



Fonte: Autorial própria.

Verificou-se que as linhagens Z9999L e ZKQMR2357L foram as menos produtivas conforme suas características genéticas, enquanto a linhagem 43NG34381L se mostrou a mais produtiva se comparada às demais. Para as linhagens Z9999L, ZKQMR2357L e 43NG34381L é possível observar que quanto maior a dose de tembotrione menor foi sua produtividade. As linhagens G55081L e PGAG10051L tiveram efeitos pontuais conforme a dose de tembotrione. A linhagem 551CB é muito susceptível a doenças, acarretando a morte das plantas após o florescimento, não sendo possível obter dados de produtividade.

#### 4. Discussão

O herbicida tembotrione é considerado um dos mais importantes à cultura do milho no mundo (Kakade et al., 2020; Rani et al., 2020; Stephenson et al., 2015). Sua utilização é recomendada para áreas de cultivo de todos os genótipos de milho, teoricamente, por atuar sobre plantas daninhas de folha estreita ou folha larga, sem causar a morte da cultura de interesse. No

entanto, seu uso tem causado a morte ou injúrias em alguns híbridos de milho doce (Williams & Pataky, 2008), assim como toxidez em diferentes linhagens (Schuelte et al., 2018). Neste sentido, faz-se importante testar a tolerância de linhagens de milho a este herbicida, cuja sensibilidade pode se refletir nos cultivares resultantes das linhagens em estudo. O estudo de sensibilidade a herbicidas deve ser aplicado especialmente às linhagens, as quais podem ter graus de sensibilidade muito diferentes entre si.

O tembotrione atua inibindo a biossíntese da 4-hidroxifenilpiruvato dioxigenase (HPPD), uma enzima-chave na rota de síntese dos carotenoides. Os carotenoides, por sua vez, são pigmentos importantes ao aparato fotossintético, atuando na dissipação do excesso de energia do fotossistema II (PSII), evitando, portanto, a foto-oxidação das clorofilas e a formação de radicais livres capazes de lesionar as biomembranas, e ainda contribui à dissipação de energia por ressonância indutiva ao centro de reação do PSII, que, por consequência, impulsiona as reações de oxirredução da fase fotoquímica da fotossíntese (Collini, 2019). Neste sentido, as plantas sensíveis ao herbicida tendem a sofrerem danos foto-oxidativos no aparato fotossintético ou perdas no *quenching* fotoquímico. Por outro lado, as plantas que toleram o herbicida, tendem a ter maior facilidade de inativação metabólica da substância, o que depende da concentração presente e da capacidade do genótipo em metabolizá-lo. A metabolização de muitos herbicidas, incluindo o tembotrione, depende da atividade da enzima citocromo P450 (Barrett, 2000), cuja regulação até hoje não é bem compreendida (Han et al., 2021), podendo, portanto, haver interferência do genótipo em questão.

Das linhagens estudadas, a ZKQMR2357L e PGAG10051L foram as mais sensíveis ao tembotrione (Quadro 2), nas quais se observou clorose foliar já com a aplicação de 120 mL ha<sup>-1</sup>, havendo aumento visual na intensidade do sintoma à medida que havia aumento da dose aplicada, cuja intensidade do sintoma persistiu até os 14 DAA (dias após a aplicação). Aos 21 DAA ainda se observava clorose, em menor intensidade que nas avaliações anteriores nas plantas que haviam recebido 240 (dose recomendada na bula) e 480 mL ha<sup>-1</sup>. Estas observações evidenciam a dificuldade dos respectivos genótipos em metabolizarem o tembotrione, o qual se mantém ativo por longo tempo, promovendo a inibição da síntese de carotenoides e a consequente oxidação das clorofilas, resultando na clorose foliar. Não se observou nenhum sintoma visual de toxicidade no genótipo 43NG34381L mesmo se aplicando o conteúdo de 480 mL ha<sup>-1</sup> se revelando o mais tolerante ao herbicida, somando-se aos genótipos G55081L, Z9999L e 551CB, que só vieram a expressar sintoma quando o uso 480 mL ha<sup>-1</sup>, obtendo notas visuais baixas quanto a toxicidade, sem nenhum sintoma aos 14 e 21 DAA dias, nos quais apenas os genótipos mais sensíveis, o ZKQMR2357L e o PGAG10051L ainda mantinham sintomas de toxidez (Quadro 2).

Embora o genótipo ZKQMR2357L seja sensível visualmente a 120 mL ha<sup>-1</sup> de tembotrione, a fotossíntese líquida (*A*) somente teve acentuado decréscimo quando as plantas receberam 240 mg ha<sup>-1</sup> aos 7 DAA e 480 mg ha<sup>-1</sup> aos 7, 14 e 21 DAA (Quadro 3). Percebe-se que o decréscimo em *A* foi limitada pelo menor potencial de eficiência fotoquímica do PSII (Fv/Fm), esta razão foi limitante apenas quando da aplicação 240 mg ha<sup>-1</sup> e 480 mL ha<sup>-1</sup>, ou seja, espera-se que nestes tratamentos danos ao aparato fotoquímico, seja em clorofila ou tilacoides, expressado pela baixa razão Fv/Fm (Hassannejad et al., 2020) tenha acarretado perdas de *A*. O comportamento de *A*, em algumas situações, também foi limitado pelo comportamento da condutância estomática (*g<sub>s</sub>*) (Quadro 3), o que evidencia que a ação do tembotrione não se limita a danos ao aparato fotoquímico como consequência do decréscimo de carotenoides, mas também interfere no comportamento estomático, evidenciado tanto pela *g<sub>s</sub>* quanto pelas taxas de transpiração (*E*) (Quadro 3). Embora não se conheça com precisão os mecanismos pelos quais diferentes herbicidas podem induzir fechamento estomático, sugere-se que seja consequência das alterações que desencadeiam no balanço hormonal das plantas, favorecendo a ação do ácido abscísico (Grossmann, 2003; David et al., 2017). Ao se analisar os dados de produtividade, infere-se que a alta sensibilidade do genótipo Z9999L em questão ao herbicida culminou na redução de seu desempenho produtivo, uma vez que nas doses 0 e 120 mL ha<sup>-1</sup> ficou no primeiro patamar produtivo, mas nos tratamentos de 480 mL ha<sup>-1</sup> ele assumiu o pior patamar de desempenho produtivo.

A linhagem PGAG10051L, apesar de ter sintomas de toxidez visuais persistentes submetido a aplicação de tembotrione teve decréscimo acentuado em fotossíntese líquida apenas quando as plantas receberam a dose 480 mL ha<sup>-1</sup> aos 7, 14 e 21 DAA, (Quadro 3). Para *gs* observa-se efeito acentuado aos 7 e 14 DAA e para *E* e Fv/Fm apenas aos 7 DAA (Quadro 2). No entanto, não se observa consequências desse comportamento sobre aspectos produtivos, uma vez que, comparativamente aos demais genótipos, não houve alteração de desempenho entre os diferentes tratamentos de dosagem do herbicida, revelando-se uma linhagem de alta resiliência quanto a sua exposição ao herbicida.

Não se observou nenhum sintoma visual de toxidez do genótipo 43NG34381L à aplicação do tembotrione. Em relação aos parâmetros fisiológicos foi observado apenas efeitos pontuais em *A*, *gs*, *E* e Fv/Fm, o que significa que o fechamento estomático não ultrapassou um limiar que impedisse um influxo de CO<sub>2</sub> suficiente à satisfatória carboxilação ocorrente no ciclo de Calvin-Benson, cuja limitação é observada com mais frequência em condições de deficiência hídrica (Salmon et al., 2020; Song et al., 2020), o que não ocorreu no experimento em função do manejo de irrigação. Da mesma forma como a linhagem foi tolerante ao herbicida em aspectos morfofisiológicos, independentemente da dosagem aplicada, também deteve o maior patamar produtivo, independentemente dos tratamentos. Comportamento semelhante de alto patamar produtivo, independentemente do tratamento, também foi observado para o genótipo G55081L.

O desempenho produtivo do genótipo Z9999L, comparativamente aos demais genótipos, foi o pior, independentemente dos tratamentos com ou sem herbicida, assim como de suas doses, apesar das altas taxas fotossintéticas em todos os tratamentos e dias de avaliações, as quais estavam nos mesmos patamares dos genótipos de alto desempenho produtivo. Neste caso, infere-se que a produção não esteja vinculada à capacidade do genótipo em produzir fotoassimilados, mas sim, ao seu particionamento e alocação nas cariopses (Smith et al., 2018).

Com base na Quadro 3, é importante salientar que o tembotrione, ao inibir a síntese da HPPD, não somente atua como inibidor da síntese de carotenoides, como é amplamente conhecido por causa do seu mecanismo de ação, mas também inibe a síntese de plastoquinona, proteína transportadora de elétrons, essencial aos processos de oxirredução da fase fotoquímica da fotossíntese (Van Almsick, 2009; Choe et al., 2014). Portanto, infere-se que, além dos distúrbios causados pelo herbicida à ação fotoprotetora exercida pelos carotenoides, a inibição na síntese de plastoquinona também interfira negativamente na performance fotossintética tal qual observado para o genótipo não-tolerante ao tembotrione ZKQMR2357L. A deficiência da plastoquinona, além de prejudicar o transporte de elétrons do PSII, ainda favorece a formação de radicais livres na antena do PSII, uma vez que a falta dessa proteína causa diminuição de atividade de uma via de dissipação de energia de excitação eletrônica.

A enzima HPPD, inibida pelo tembotrione, é fundamental à formação do homogentisato, o qual, além da plastoquinona, também é o precursor dos tocoferóis, os quais atuam como antioxidantes nas membranas dos cloroplastos (Lushchak & Semchuk, 2012). De acordo com (Munné-Bosch et al., 2007), é provável que o  $\alpha$ -tocoferol presente nos tilacoides atue no sequestro de oxigênio singleto (<sup>1</sup>O<sub>2</sub>) e radicais peróxil lipídico, protegendo o aparato fotossintético dos danos dos radicais livres e da peroxidação lipídica. Portanto, ao se mencionar a ação herbicida do tembotrione, é plausível que atribuamos seu efeito inibitório não somente à síntese de carotenoides, mas também de moléculas que diretamente atuam como antioxidantes e no transporte de elétrons nas reações de oxirredução da fotossíntese.

## 5. Conclusões

A linhagem de milho Z9999L não apresentou sensibilidade ao herbicida tembotrione nas variáveis fotossíntese líquida, condutância estomática, transpiração e na razão Fv/Fm, mas teve baixa produtividade e, portanto, inerente à capacidade produtiva do genótipo.

A linhagem de milho 551CB apresentou sensibilidade ao herbicida tembotrione em notas visuais quando aplicado a dose 480 mL ha<sup>-1</sup> aos 7 DAA, cujos sintomas visuais de toxicidade foram desaparecendo ao longo do tempo.

A linhagem de milho ZKQMR2357L foi sensível ao herbicida tembotrione, apresentando variação em função do aumento das doses do herbicida nas variáveis morfofisiológicas estudadas, cuja sensibilidade afetou a produtividade de grãos.

A linhagem de milho PGAG10051L se mostrou sensível ao tembotrione, com clorose acentuada e baixa taxa fotossintética apenas quando as plantas foram tratadas com 480 mL ha<sup>-1</sup> do herbicida, não afetando a produtividade de grãos.

As linhagens de milho G55081L e 43NG34381L não apresentaram sensibilidade ao herbicida tembotrione nas doses aplicadas.

As diferenças encontradas entre as linhagens de milho-doce ressaltam a influência da homozigose na sensibilidade diferencial aos herbicidas e a necessidade de investigações a respeito de potenciais efeitos fitotóxicos de herbicidas comumente utilizados, como o tembotrione, durante o desenvolvimento de novas linhagens comerciais.

## Referências

- Abit, J. M. et al. (2009) Differential response of grain sorghum hybrids to foliar-applied mesotrione. *Weed Technol.*, 23 (1), 28-33.
- Barrett, M. (2000) The role of cytochrome P450 enzymes in herbicide metabolism. In: Cobb, A. H. & Kirkwood, R. C. (eds.) *Herbicides and Their Mechanisms of Action*. Boca Raton, FL: CRC, 25-37.
- Bollman, J. D. et al. (2008) Efficacy and tolerance to HPPD-inhibiting herbicides in sweet corn. *Weed Technology*, 22 (4), 666-674.
- Choe, E., Williams, M. M., Boydston, R. A., Huber, J. L., Huber, S. C. & Pataky, J. K. (2014). Photosystem II-inhibitors play a limited role in sweet corn response to 4-hydroxyphenyl pyruvate dioxygenase-inhibiting herbicides. *Agronomy Journal*, 106 (4), 1317-1323.
- Christoffoleti, P.J. & Ovejero, R.F. (2008) Resistência das plantas daninhas a herbicidas: definições, bases e situação no Brasil e no mundo. In: Christoffoleti, P.J. Aspectos de resistência de plantas daninhas a herbicidas. Piracicaba: Associação Brasileira de Ação à Resistência de Plantas Daninhas, 9-34.
- Collini, E. (2019). Carotenoids in photosynthesis: The revenge of the “Accessory” pigments. *Chem*, 5(3), 494-495.
- Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, Brasil). (2020) *Acompanhamento da Safra brasileira de Grãos: safra 2019/2020: décimo segundo levantamento*. Brasília, DF: Conab. <https://www.conab.gov.br/infoagro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>.
- David, F. A., Galon, L., Perin, G. F., Forte, C. T., Concengo, G., Mossi, A. J. E., ... & Moisinho, I. S. (2017). Selectivity of herbicides to erva mate (*Ilex paraguariensis*) plants. *African Journal of Agricultural Research*, 12 (48), 3389-3398.
- FAO. 2019. World Food and Agriculture – Statistical pocketbook 2019. Rome. <http://www.fao.org/3/ca6463en/ca6463en.pdf>
- Frans, R., Talbert, R., Marx, D., Crowley, H. (1986) Experimental design and techniques for measuring and analyzing plant responses to weed control practices. In: Camper, N. D. (Ed.). *Southern Weed Science Society. Research methods in weed science*, 3<sup>rd</sup>, WSSA, Champaign, 29-45.
- Freitas, I. L. J. et al. (2013) Ganho genético avaliado com índices de seleção e com REML/Blup em milho-pipoca. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48 (11), 1464-1471.
- Grossmann, K. (2003) Mediation of herbicide effects by hormone interactions. *Journal of Plant Growth Regulation*, 22(1), 109-122.
- Han, H., Yu, Q., Beffa, R., González, S., Maiwald, F., Wang, J. & Powles, S. B. (2021) Cytochrome P450 CYP81A10v7 in *Lolium rigidum* confers metabolic resistance to herbicides across at least five modes of action. *The Plant Journal*, 105 (1), 79-92.
- Hassannejad, S., Lotfi, R., Ghafarbi, S. P., Oukarroum, A., Abbasi, A., Kalaji, H. M. & Rastogi, A. (2020) Early Identification of Herbicide Modes of Action by the Use of Chlorophyll Fluorescence Measurements. *Plants*, 9 (4), 529.
- Kakade, S. U., Deshmukh, J. P., Thakare, S. S. & Solanke, M. S. (2020) Efficacy of pre-and post-emergence herbicides in maize. *Indian Journal of Weed Science*, 52(2), 143-146.
- Karam, D., Silva, J. A. A., Pereira filho, I. A. & Magalhães, P. C. (2009) *Características do herbicida tembotrione na cultura do milho*. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Circular Técnica 129.
- Lushchak, V. I., & Semchuk, N. M. (2012) Tocopherol biosynthesis: chemistry, regulation and effects of environmental factors. *Acta Physiologiae Plantarum*, 34(5), 1607-1628.
- Mañanares, L. B., Netto, A. G., Fátima Andrade, J., Presoto, J. C. Silva, L. J. F. & Carvalho, S. J. P. (2019) Seletividade de tembotrione aplicada em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho safrinha. *Revista Agrogeambiental*, 10 (4), doi:10.18406/2316-1817v10n420181167.
- Munné-Bosch, S., Weiler E. W., Alegre, L., Muller, M., Duchting, P. & Falk, J. (2007)  $\alpha$ -Tocopherol may influence cellular signaling by modulating jasmonic acid levels in plants. *Planta*, 225, 681-691

- Oliveira, E. J., Melo, H. C., Alves, F. R. R., Melo, A. P. C., Trindade, K. L., Guedes, T. C., Sousa, C. M. (2020) Morphophysiology and yield of green corn cultivated under different water depths and nitrogen doses in the cerrado conditions of Goiás, Brazil. *Research, Society and Development*, 9(10), e6179108857, 10.33448/rsd-v9i10.8857.
- Rani, N., Duhan, A. , & Tomar, D. (2020). Ultimate fate of herbicide tembotrione and its metabolite TCMBAs in soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 203, 111023.
- RNC. Registro Nacional de Cultivares – RNC (2022) [http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares\\_registradas.php](http://sistemas.agricultura.gov.br/snpc/cultivarweb/cultivares_registradas.php)
- Salmon, Y., Lintunen, A., Dayet, A., Chan, T., Dewar, R., Vesala, T. & Hölttä, T. (2020). Leaf carbon and water status control stomatal and nonstomatal limitations of photosynthesis in trees. *New phytologist*, 226 (3), 690-703.
- Schuelter, A. R., Da Silva, M. F., De Souza, I. R. P., Marcolin, J. & Schuster, I. (2018). Genetic tolerance of maize lines to tembotrione and nicosulfuron. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 17(2), 317-327.
- Șerban, M., Măturaru, G., Lazăr, C., Grădilă, M. & Ciontu, C. (2021). Research on the selectivity and the efficacy of herbicides in controlling weeds for the maize crop. *Romanian Agricultural Research*, 38, 371-379
- Singh, G. M., Xu, J., Schaefer, D., Day, R., Wang, Z. & Zhang, F. (2022). Maize diversity for fall armyworm resistance in a warming world. *Crop Science*, 62(1), 1-19.
- Smith, M. R., Rao, I. M. & Merchant, A. (2018) Source-sink relationships in crop plants and their influence on yield development and nutritional quality. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1889.
- Song, X., Zhou, G., He, Q. & Zhou, H. (2020). Stomatal limitations to photosynthesis and their critical water conditions in different growth stages of maize under water stress. *Agricultural Water Management*, 241, 106330.
- Stephenson, D. O., Bond, J. A., Landry, R. L. & Edwards, H. M. (2015). Weed management in corn with postemergence applications of tembotrione or thienacarbazone: tembotrione. *Weed Technology*, 29(3), 350-358.
- Van Almsick, A. (2009). New HPPD-inhibitors—a proven mode of action as a new hope to solve current weed problems. *Outlooks on Pest Management*, 20(1), 27-30.
- Van Almsick, A. et al. (2009) Tembotrione – a new exceptionally safe crossspectrum herbicide for corn production. *Bayer Cropscience Journal*, 62(1), 5-16.
- Walsh, M. J. et al. (2012) Efeitos sinérgicos da atrazina e mesotriona em populações suscetíveis e resistentes de rabanete (*Raphanus raphanistrum*) e o potencial de superação da resistência aos herbicidas triazina. *Weed Technology*, 26(2), 341-347.
- Williams, M. M. & Pataky, J. K. (2008). Genetic basis of sensitivity in sweet corn to tembotrione. *Weed Science*, 56(3), 364-370.
- Williams, M. M. & Pataky, J. K. (2010) Factors affecting differential sensitivity of sweet corn to HPPD-inhibiting herbicides. *Weed science*, 58(3), 289-294.
- Zimmermann, F. J. P. (2014) *Estatística aplicada à pesquisa agrícola*. (2a ed.), Editora Embrapa. 582 pp.