

# RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de  
09/02/2023

**JANIA CLAUDIA CAMILO DOS SANTOS**

**HORMESIS DE GLYPHOSATE EM PLANTAS DE *Carthamus tinctorius* L. EM  
FUNÇÃO DO REGIME HÍDRICO**

**Botucatu**

**2021**



**JANIA CLAUDIA CAMILO DOS SANTOS**

**HORMESIS DE GLYPHOSATE EM PLANTAS DE *Carthamus tinctorius* L. EM  
FUNÇÃO DO REGIME HÍDRICO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutora em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva

**Botucatu**

**2021**

S237h

Santos, Jania Claudia Camilo dos

Hormesis de glyphosate em plantas de *Carthamus tinctorius* L. em função do regime hídrico / Jania Claudia Camilo dos Santos. -- Botucatu, 2021

115 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Marcelo de Almeida Silva

1. N-(fosfonometil)glicina. 2. Curvas de dose-resposta. 3. Estresse abiótico. 4. Trocas gasosas. 5. Estresse oxidativo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: HORMESIS DE GLYPHOSATE EM PLANTAS DE *Carthamus tinctorius* L. EM FUNÇÃO DO REGIME HÍDRICO

AUTORA: JANIA CLAUDIA CAMILO DOS SANTOS

ORIENTADOR: MARCELO DE ALMEIDA SILVA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. MARCELO DE ALMEIDA SILVA (Participação Virtual)  
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI (Participação Virtual)  
Proteção Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. FERNANDO BROETTO (Participação Virtual)  
Departamento de Química e Bioquímica / Instituto de Biociências de Botucatu - UNESP

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> ELZA ALVES CORREA (Participação Virtual)  
Coordenadoria Executiva / Unidade de Registro / UNESP

Prof. Dr. REGINALDO FERREIRA SANTOS (Participação Virtual)  
Núcleo de Inovação do Oeste do Paraná / Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Botucatu, 09 de fevereiro de 2021



Aos meus amados pais,  
Maria José Camilo e José  
Domingos dos Santos, e  
meu noivo Deoclecio Jardim  
Amorim por todo amor e  
apoio durante esta  
caminhada.

**Dedico**





## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu Deus, todo poderoso pelo cuidado e sabedoria proporcionada para vencer os obstáculos durante esta jornada.

Aos meus pais José Domingos dos Santos e Maria José Camilo, e ao meu irmão Janderson Santos pela base familiar, amor, carinho, suporte e apoio incondicional.

Ao meu noivo, Deoclecio Jardim Amorim, por todo amor, carinho, atenção, cuidado, companheirismo, ensinamentos, ajuda e motivação tornando esta caminhada mais leve e agradável.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo de Almeida Silva, pela orientação, ensinamentos, amizade, confiança e incentivo durante esta jornada.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia – Agricultura, da Faculdade de Ciências Agrônomicas, Departamento de Produção Vegetal, pela oportunidade de realização do Doutorado e pela infraestrutura disponibilizada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM) pela parceria nas análises fornecidas, em especial aos professores Caio Antônio Carbonari e Edivaldo Domingues Velini, pelos conhecimentos compartilhados e ao técnico José Roberto Marques Silva e Pós-doutorando Renato Nunes Costa pelo auxílio na condução das análises.

Ao Prof. Dr. Rogério Peres Soratto pela casa de vegetação concedida para condução dos experimentos e ao técnico Gilberto Winckler, pela concessão dos tensiômetros utilizados na pesquisa.

À banca examinadora pela disponibilidade de participação e pelas sugestões na melhoria deste trabalho.

Aos amigos e companheiros do Laboratório de Ecofisiologia Aplicada à Agricultura (LECA), que tive a oportunidade de conviver durante os últimos anos, Dayane Ribeiro, Vanessa Rosa, Anna Luiza dos Santos, Mariana Sab, Vinícius Ribeiro, Vicente Silva, Karolyne Santos, Melina Carnietto, Gabriel Germino, Carolina Ruv, Mara Rúbia Melo, e aos estagiários, de que, de alguma forma, contribuíram para realização deste trabalho. Em especial à Dayane Ribeiro, pela amizade, parceria e ajuda na condução dos experimentos tornando o trabalho mais leve. À Vanessa Rosa e Anna Luiza dos Santos pelo auxílio nas análises bioquímicas nos dando o suporte necessário. À Thayse Valéria Silva pela amizade, companheirismo, parceria e cuidado durante esta jornada. A vocês minha gratidão!

Aos amigos e companheiros da Pós-graduação Laís Pereira, Fernanda Bortolheiro, Marcela Brunelli-Nascentes, Breno Bezerra, Élvis Alves e Isabelly Marques que forneceram algum suporte durante a condução do trabalho.

A todos meus sinceros agradecimentos!



## RESUMO

Diante do atual cenário de mudanças climáticas, grandes prejuízos são causados no setor agrícola pela ausência de chuvas. O plantio de cártamo, indicado para regiões semiáridas, vem crescendo no mundo, devido à capacidade das plantas de suportar condições de déficit hídrico e pelo potencial na produção de biocombustível. Estudos sobre o potencial estimulatório de baixas doses de glyphosate estão sendo realizados, para entender os mecanismos de hormesis capazes de estimular o crescimento das plantas. Nesta pesquisa, objetivou-se determinar o efeito atenuador de baixas doses de glyphosate sob condições de déficit hídrico em cártamo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, com duas tensões de água no solo (-10 e -70 kPa), e 10 doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), com quatro repetições em dois ciclos. As plantas foram avaliadas no decorrer de 28 dias após aplicação dos tratamentos, analisando os parâmetros de crescimento, fisiológicos e bioquímicos. Foram constatadas melhorias nas plantas sob condições de déficit hídrico quando tratadas com baixas doses de glyphosate, com incremento em crescimento, evidenciado pela altura da planta e área foliar, equivalendo-se às plantas em capacidade de campo, com manutenção de taxas fotossintéticas, ativação de mecanismos eficientes de proteção contra danos fotooxidativos, além de aumento em atividade de enzimas antioxidantes. Baixas doses de glyphosate melhoraram a eficiência metabólica do cártamo submetido ao déficit hídrico.

**Palavras-chave:** *N*-(fosfonometil)glicina. Curvas de dose-resposta. Estímulo de crescimento. Estresse abiótico. Trocas gasosas. Estresse oxidativo.



## ABSTRACT

In view of the current climate change scenario, large losses are caused in the agricultural sector by the absence of rain. The safflower crop, indicated for semi-arid regions, has been growing worldwide, due to the capacity of plants to withstand water deficit conditions and the potential for biofuel production. Studies on the stimulatory potential of low doses of glyphosate are being carried out to understand the mechanisms of hormesis capable of stimulating plant growth. This research aimed to determine the attenuation effect of low doses of glyphosate under conditions of water deficit in safflower. The experiment was conducted in a greenhouse, with two water tensions in the soil (-10 and -70 kPa), and 10 doses of glyphosate (0, 1.8, 3.6, 7.2, 18, 36, 72, 180, 360 and 720 g a.e. ha<sup>-1</sup>), with four repetitions in two cycles. The plants were evaluated during 28 days after application of the treatments, analysing the growth, physiological and biochemical parameters. Improvements were found in plants under water deficit conditions when treated with low doses of glyphosate, with an increase in growth, evidenced by plant height and leaf area, equivalent to hydrated plant, with maintenance of photosynthetic rates, activation of efficient protection mechanisms against photooxidative damage, in addition to increased activity of antioxidant enzymes. Low doses of glyphosate improved the metabolic efficiency of safflower submitted to water deficit.

**Keywords:** *N*-(phosphonomethyl)glycine. Dose-response curves. Growth stimulus. Abiotic stress. Gas exchange. Oxidative stress.



## LISTA DE FIGURAS DO CAPÍTULO 1

- Figura 1** - Curva de retenção de água no solo de um solo argiloso para profundidades de 0 a 20 cm gerada pelos parâmetros de van Genuchten<sup>35</sup>.  $R^2$  = coeficiente de determinação.....31
- Figura 2** - Efeitos da dose-resposta do glyphosate aos 7, 14, 21 e 28 dias após tratamento, para número de folhas (A, B) e altura de planta (C, D) em plantas de *Carthamus tinctorius* tratadas com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos (exp.1 e exp.2) foram combinados em um único experimento de acordo com a significância da análise de variância ( $p > 0,05$ ). Dados são referentes às médias de oito repetições por tratamento (média  $\pm$  desvio padrão).....39
- Figura 3** - Efeitos da dose-resposta do glyphosate aos 28 dias após tratamento, para massa de matéria seca (A, B) e área foliar (C, D) em plantas de *Carthamus tinctorius* tratadas com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos (exp.1 e exp.2) foram combinados em um único experimento de acordo com a significância da análise de variância ( $p > 0,05$ ). Dados são referentes às médias de oito repetições por tratamento (média  $\pm$  desvio padrão).....40
- Figura 4** - Dose-resposta de plantas de *Carthamus tinctorius* tratadas com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos, sem estresse hídrico (-10 kPa) (A) e com déficit hídrico (-70 kPa) (B), e número de dias para floração (C) aos 28 dias após o tratamentos. Plantas de *Carthamus tinctorius* submetidas a regimes hídricos em diferentes doses de glyphosate apresentaram efeito hormético entre as características de crescimento até esta fase de desenvolvimento, com início do florescimento em plantas sob déficit hídrico. ....41
- Figura 5** - Efeitos da dose-resposta do glyphosate aos 3 e 7 dias após tratamento, taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A) (A, B, C, D), condutância estomática (gs) (E, F, G, H), taxa transpiratória (E) (I, J, K, L) e concentração interna de carbono (C<sub>i</sub>) (M, N, O, P) em plantas de *Carthamus tinctorius* tratadas com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados são referentes a média de dois experimentos independentes (exp.1 e exp.2) de quatro repetições por tratamento (média  $\pm$  desvio padrão).....50
- Figura 6** - Efeitos da dose-resposta do glyphosate aos 3 e 7 dias após tratamento, eficiência de carboxilação (EC) (A, B, C, D) e eficiência do uso da água (EUA) (E, F, G, H) em plantas de *Carthamus tinctorius* tratadas com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados são referentes à média de dois



experimentos independentes (exp.1 e exp.2) de quatro repetições por tratamento (média ± desvio padrão). ..... 53

## LISTA DE FIGURAS DO CAPÍTULO 2

**Figura 1** - Curva de retenção de água no solo de um solo argiloso para profundidades de 0 a 20 cm gerada pelos parâmetros de van Genuchten (1980).  $R^2$  = coeficiente de determinação. .... 71

**Figura 2** - Efeitos da dose-resposta do glyphosate pela modelagem monofásica (Eq (2))<sup>Streibig (1988)</sup> ou bifásica (Eq (3))<sup>Cedergreen et al. (2005)</sup> para eficiência quântica máxima do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) (A, B, C, D), rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $\Phi_{PSII}$ ) (E, F, G, H) e taxa de transporte de elétrons (ETR) (I, J, K, L) em plantas de *Carthamus tinctorius*, aos 3 e 7 dias após tratamentos com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados referentes à média de dois experimentos independentes (Experimento 1 e Experimento 2) de quatro repetições por tratamento (média ± desvio padrão). ..... 79

**Figura 3** - Efeitos da dose-resposta do glyphosate pela modelagem monofásica (Eq (2))<sup>Streibig (1988)</sup> e exponencial (Eq (4))<sup>Mollae et al. (2020a)</sup> para coeficiente de extinção fotoquímico (qP) (A, B, C, D) e coeficiente de extinção não fotoquímico (NPQ) (E, F, G, H) em plantas de *Carthamus tinctorius*, aos 3 e 7 dias após tratamentos com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados referentes à média de dois experimentos independentes (Experimento 1 e Experimento 2) de quatro repetições por tratamento (média ± desvio padrão). ..... 80

**Figura 4** - Análise de cluster (mapa de calor) de vários compostos bioquímicos (peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), peroxidação lipídica (LPO), prolina, superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), peroxidase (POD) e ascorbato peroxidase (APX) em plantas de *Carthamus tinctorius*, aos 3 (A) e 28 (B) dias após tratamentos com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa (SE) e -70 kPa (CE)). Os padrões mostrados no mapa de calor referem-se à média de quatro repetições por tratamento para cada metabólito. Os gradientes de cores vermelha e azul indicam maior e menor atividade, respectivamente. .... 82

**Figura 5** - Concentração de ácido chiquímico predita (ln(x)) utilizando a equação de Gompertz (Eq (5))<sup>Gompertz (1825)</sup>, e concentrações de glyphosate e ácido aminometilfosfônico (AMPA) (ln(x+1)) em plantas de *Carthamus tinctorius*, aos 3 dias após tratamentos com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados referentes à média de dois experimentos independentes (Experimento 1 (A, B) e Experimento 2 (C, D)) com quatro repetições por tratamento (média ± desvio padrão). ..... 83

**Figura 6** - Concentração de peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) (A, B), peroxidação lipídica (concentração MDA) (LPO) (C, D) e prolina (E, F) em plantas de *Carthamus tinctorius*, aos 3 e 28 dias após tratamentos com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). O Fator A representa as doses de glyphosate (barra cinza claro) e o Fator B representa dois regimes hídricos (barra cinza escuro tracejado). Letras minúsculas nas barras comparam as doses de glyphosate e maiúsculas nas barras comparam os regimes hídricos pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Dados das barras são médias ± desvio padrão de quatro repetições por tratamento. ....84

**Figura 7** - Atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD) (A, B), catalase (CAT) (C, D), peroxidase (POD) (E, F) e ascorbato peroxidase (APX) (G, H) em plantas de *Carthamus tinctorius*, aos 3 e 28 dias após tratamentos com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Efeito para doses de glyphosate (barra cinza tracejada) e dados não significativos, ns, (barra branca). Os dois regimes hídricos são representados em tensão hídrica de -10 kPa (barra preta) e tensão hídrica de -70 kPa (barra cinza). Letras minúsculas nas barras comparam as doses de glyphosate e maiúsculas nas barras comparam os regimes hídricos pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. Dados das barras são médias ± desvio padrão de quatro repetições por tratamento. ....86



## LISTA DE TABELAS DO CAPÍTULO 1

**Tabela 1** - Parâmetros dos modelos de dose-resposta  $\pm$  erro padrão da modelagem monofásica (Eq (2))<sup>35</sup> ou bifásica (Eq (3) ou (4))<sup>36,37</sup> para número de folhas e altura de plantas de *Carthamus tinctorius* aos 7, 14, 21 e 28 dias após o tratamento com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos (exp.1 e exp.2) foram combinados em um único experimento de acordo com a significância da análise de variância ( $p > 0,05$ ). .....35

**Tabela 2** - Parâmetros do modelo de dose-resposta  $\pm$  erro padrão da modelagem bifásica (Eq (3))<sup>36</sup> para massa de matéria seca e área foliar de plantas de *Carthamus tinctorius* aos 28 dias após o tratamento com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos (exp.1 e exp.2) foram combinados em um único experimento de acordo com a significância da análise de variância ( $p > 0,05$ ). .....37

**Tabela 3** - Número de ramos (A, B) e número de capítulos (C, D) de plantas de *Carthamus tinctorius* aos 28 dias após o tratamento com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos (exp.1 e exp.2) foram combinados em um único experimento de acordo com a significância da análise de variância ( $p > 0,05$ ). .....42

**Tabela 4** - Parâmetros dos modelos de dose-resposta  $\pm$  erro padrão da modelagem monofásica (Eq (2))<sup>35</sup> ou bifásica (Eq (3) ou (4))<sup>36,37</sup> taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> (A), condutância estomática (gs), taxa transpiratória (E) e concentração interna de carbono (C<sub>i</sub>) de plantas de *Carthamus tinctorius* aos 3 e 7 dias após o tratamento com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos independentes (exp.1 e exp.2). .....46

**Tabela 5** - Parâmetros dos modelos de dose-resposta  $\pm$  erro padrão da modelagem monofásica (Eq (2))<sup>35</sup> ou modelo exponencial (Eq (5))<sup>27</sup> eficiência de carboxilação (EC) e eficiência do uso da água (EUA) de plantas de *Carthamus tinctorius* aos 3 e 7 dias após o tratamento com baixas doses de glyphosate (0; 1,8; 3,6; 7,2; 18; 36; 72; 180; 360 e 720 g e.a. ha<sup>-1</sup>), em dois regimes hídricos (-10 kPa e -70 kPa). Dados dos dois experimentos independentes (exp.1 e exp.2). .....52

## LISTA DE TABELA DO CAPÍTULO 2

**Tabela 1** - Análise química e física do solo (0-20 cm) utilizado no experimento.....70



## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>21</b>
<b>CAPÍTULO 1 - HORMESIS DE GLYPHOSATE MITIGA O EFEITO DO DÉFICIT HÍDRICO EM CÁRTAMO (<i>Carthamus tinctorius</i> L.).....</b>	<b>24</b>
1.1 INTRODUÇÃO.....	26
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	29
1.3 RESULTADOS.....	34
1.4 DISCUSSÃO.....	55
1.5 CONCLUSÕES.....	59
REFERÊNCIAS.....	59
<b>CAPÍTULO 2 - HORMESIS DE GLYPHOSATE ATENUA O ESTRESSE POR DÉFICIT HÍDRICO EM CÁRTAMO (<i>Carthamus tinctorius</i> L.) POR MEIO DA MODULAÇÃO DA FISIOLOGIA E DA BIOQUÍMICA.....</b>	<b>64</b>
2.1 INTRODUÇÃO.....	67
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	69
2.3 RESULTADOS.....	78
2.4 DISCUSSÃO.....	87
2.5 CONCLUSÕES.....	91
REFERÊNCIAS.....	92
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>97</b>
APÊNDICE A – TABELAS SUPLEMENTARES DO CAPÍTULO 1.....	100
APÊNDICE B – TABELAS SUPLEMENTARES DO CAPÍTULO 2.....	108



## INTRODUÇÃO GERAL

O cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) é uma planta oleaginosa, pertencente à família Asteraceae, sendo considerada uma das culturas mais antigas do mundo, com três indicações de centros de origem propostos por Índia, Afeganistão e Etiópia (FLEMMER et al., 2015; BORTOLHEIRO et al., 2017).

A importância mundial da cultura tem aumentado e isso desperta o interesse na comunidade científica, o cultivo no mundo cresceu devido suas características oleaginosas, com sementes que contêm de 35 a 45% de teor de óleo, como benefício econômico para o setor de biocombustível, possui elevado valor nutricional, que abrange cerca de 75% de ácido linoleico, tocoferóis e vitamina E (BEYYAVAS et al., 2011; CANAVAR et al., 2014; QUEIROGA et al., 2021), sua utilidade envolve ainda diversos fins culinários e têxteis (DELSHAD et al., 2018).

No campo medicinal, pesquisas farmacológicas modernas sugerem potencial comprovado no tratamento de várias doenças, em que atua na redução do colesterol sanguíneo, auxilia na dilatação de artérias, no alívio da dor, doenças cardiovasculares, ginecológicas, regulação do sistema imunológico, além de propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias (DELSHAD et al., 2018; BAE et al., 2002; LIAO et al., 2019; ZONG-JIN et al., 2019; BACCHETTI et al., 2020).

A cultura apresenta características agrônômicas importantes, como maior tolerância ao déficit hídrico, podendo ser cultivada em regiões com precipitações de 300 a 600 mm anuais, possui capacidade de suportar grande amplitude de temperatura, que pode variar de -7 a 40 °C, suporta ainda ventos fortes e quentes, além de baixa umidade relativa (EMONGOR, 2010; QUEIROGA et al., 2021).

A maior tolerância ao déficit hídrico deve-se ao profundo sistema radicular pivotante, que abrange cerca de 2-3 m de profundidade, permitindo a planta buscar água em níveis não disponível para a maioria das culturas, sendo assim, indicada ao cultivo em regiões semiáridas, com atenção para a fase vegetativa por ser considerada a mais crítica ao déficit hídrico (ISTANBULLOUGLU et al., 2009; BORTOLHEIRO e SILVA, 2017).

O déficit hídrico interfere em características importantes às plantas, que influenciam no crescimento e desenvolvimento da cultura, modulados por processos fisiológicos e bioquímicos. Maior tolerância às plantas sob condições de déficit



hídrico são evidenciadas por baixas doses de glyphosate (SILVA et al., 2016; MOLLAEI et al., 2020).

Sob condições de déficit hídrico a fotossíntese é primeiramente afetada pelo fechamento estomático que causa desequilíbrio entre as fases fotoquímicas e redução do carbono, diminuindo a atividade fotossintética pela ocorrência da inibição ou redução na transferência de elétrons (MAXWELL e JOHNSON, 2000).

Alterações metabólicas ativam os mecanismos de defesa evitando o acúmulo de danos induzidos pelo estresse gerado pelas espécies reativas de oxigênio (ERO), que ativam a proteção celular através do sistema de enzimas antioxidantes que atuam desintoxicando as células e por mecanismos fotoprotetores que dissipam o excesso de energia, ou ainda por alterações morfofisiológicas que atuam minimizando os danos gerados pelo déficit hídrico (FOYER e NOCTOR, 2011; GOMES et al., 2017). Plantas mais tolerantes ao déficit hídrico podem ser obtidas através da utilização de algumas práticas agrícolas, como a aplicação de baixas doses de glyphosate, que atua melhorando as defesas da planta conferindo adaptabilidade.

O glyphosate (*N*-(fosfonometil)glicina) é um herbicida de ação lenta, sistêmico, não seletivo e pós-emergente, que atua inibindo a ação da enzima EPSPS (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase) da via do ácido chiquímico impedindo a biossíntese dos aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) (DUKE e POWLES, 2008; VELINI et al., 2008; DUKE, 2019). O efeito estimulatório no crescimento de várias espécies de plantas tratadas com baixas doses de glyphosate tem sido revelado em pesquisas desenvolvidas na Faculdade de Ciências Agrônômicas/UNESP (VELINI et al., 2008; SILVA et al., 2009; SILVA et al., 2013, BRITO et al., 2018; CARVALHO et al., 2018; NASCENTES et al., 2018; MORAES et al., 2019; CERVEIRA JUNIOR et al., 2020; PINCELLI-SOUZA et al., 2020).

A exposição da planta a baixas doses pode causar diferentes dose-respostas, subdivididas em duas partes, sendo a primeira parte da resposta monofásica é caracterizada pela falta de mudanças significativas das respostas, compreendendo apenas a inibição em altas doses, seguida por uma segunda parte da resposta de baixa dose, que pode ser caracterizada por mudanças nas respostas médias antes da inibição por altas doses (BELZ et al., 2018).

O pico estimulatório é atingido no padrão bifásico de dose-resposta, com inibição em doses altas, conhecido como hormesis, que é definida como uma resposta de dose bifásica adaptativa/protetora causada por estressores químicos que quando utilizados em baixas doses em plantas resultam em melhor desempenho com aumento nas defesas celulares, visando a restauração da homeostase celular (BERRY III e LÓPEZ-MARTÍNEZ, 2020).

Os principais modelos utilizados para modelar o padrão bifásico de dose resposta, são os modelos desenvolvidos por Brain e Cousens (1989) e Cedergreen et al. (2005), e por meio de reparametrização desses modelos podemos obter características quantitativas como  $ED_{50}$  que é a dose que causa 50% de inibição,  $ED_{110}$  que é a dose que provoca estimulação de 110% do controle, M que é a dose que causa estimulação máxima, LDS que é a dose limite para estimulação e o  $y_{max}$  que é a resposta estimulatória máxima, potência tóxica, zona de dose hormética e  $dist2$  que é a distância entre a dose M e LDS (SCHABENBERGER et al., 1999; BELZ e PIEPHO, 2012; BELZ e PIEPHO, 2015).

A cultura do cártamo, apesar da tolerância às condições de déficit hídrico, pouco se conhece sobre o comportamento das plantas quando submetidas a baixas doses de glyphosate, principalmente sobre as características que conferem melhorias no desenvolvimento de plantas tratadas com glyphosate sob condições de déficit hídrico. Diante do exposto, a hipótese geral desta pesquisa é que baixas doses de glyphosate são capazes de promover melhorias nas características fisiológicas, bioquímicas e de crescimento das plantas de cártamo sob déficit hídrico.

Para testar esta hipótese, a pesquisa foi dividida em dois trabalhos, sendo o Capítulo 1, destinado a investigar o comportamento da cultura do cártamo durante o estágio vegetativo, após tratamentos com baixas doses de glyphosate em condições de déficit hídrico nas características de crescimento, trocas gasosas e reprodutivas. E o Capítulo 2, designado a pesquisar os mecanismos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na mitigação do estresse hídrico ocasionado pelos tratamentos com baixas doses de glyphosate na cultura do cártamo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em termos práticos, as plantas tratadas com baixas doses de glyphosate apresentaram maior tolerância ao déficit hídrico em relação às plantas controle sob condições de déficit hídrico, conferida através de estímulos horméticos que promoveram aumento do metabolismo aos níveis fisiológicos e bioquímicos, resultando em crescimento e desenvolvimento das plantas, que atingiram valores próximos ou iguais às plantas controle em condições hídricas normais, fator este considerado importante diante do atual cenário de mudanças climáticas.

Baixas doses de glyphosate ( $< 37 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ ) mitigaram os eventuais danos gerados pelo déficit hídrico severo em plantas de cártamo, com redução do estímulo em doses  $> 75 \text{ g e.a. ha}^{-1}$ .

As plantas de cártamo em condições de déficit hídrico, quando tratadas com baixas doses de glyphosate, atingiram níveis de AP e AF semelhantes aos das plantas controle bem irrigadas, fato este evidenciado pelo eficiente maquinário fisiológico e bioquímico, que atuaram em conjunto na manutenção das taxas de A, e reduziram  $g_s$  e  $E$ , resultando em aumentos de AP e AF, conferidos pela manutenção da eficiência dos mecanismos de prevenção a danos no aparato fotossintético,  $F_v/F_m$ ,  $\Phi_{PSII}$ , ETR,  $qP$  e NPQ, em que as plantas não acumularam ácido chiquímico, glyphosate ou AMPA, com aumento no potencial do mecanismo osmoprotetor (prolina), com reduções nos níveis de  $H_2O_2$  e LPO, prevenindo os danos fotooxidativos pelas ERO devido à eficiência na atividade de enzimas antioxidantes (SOD, CAT, POD e APX).

Portanto, baixas doses de glyphosate aplicadas em plantas de cártamo sob condições de déficit hídrico durante a fase vegetativa de desenvolvimento atuaram aumentando a tolerância das plantas ao déficit hídrico severo, se tornando uma importante ferramenta direcionada aos produtores rurais em áreas propensas à deficiência hídrica, sendo uma importante descoberta sobre hormesis de glyphosate diante do cenário atual de mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

- BACCHETTI, T.; MORRESI, C.; BELLACHIOMA, L.; FERRETTI, G. Antioxidant and pro-oxidant properties of *Carthamus tinctorius*, hydroxy safflor yellow A, and safflor yellow A. **Antioxidants**, v. 9, n. 2, p. 119, 2020.
- BAE, C. S.; PARK, C. H.; CHO, H. J.; HAN, H. J.; KANG, S. S.; CHOI, S. H. Therapeutic effects of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) seed powder on osteoporosis. **Applied Microscopy**, v. 32, n. 3, p. 285-290, 2002.
- BELZ, R. B.; PIEPHO, H. P. Statistical modeling of the hormetic dose zone and the toxic potency completes the quantitative description of hormetic dose responses. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 34, n. 5, p. 1169-1177, 2015.
- BELZ, R. G.; PATAMA, M.; SINKKONEN, A. Low doses of six toxicants change plant size distribution in dense populations of *Lactuca sativa*. **Science of the Total Environment**, v. 631, p. 510-523, 2018.
- BELZ, R. G.; PIEPHO, H. P. Modeling effective dosages in hormetic dose-response studies. **PLoS One**, v. 7, n. 3, p. e33432, 2012.
- BERRY III, R.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, G. A dose of experimental hormesis: When mild stress protects and improves animal performance. **Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology**, v. 242, p. 110658, 2020.
- BEYYAVAS, V.; HALILOGLU, H.; COPUR, O.; YILMAZ, A. Determination of seed yield and yield components of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars, lines and populations under the semi-arid conditions. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 527-534, 2011.
- BORTOLHEIRO, F. P. A. P.; SILVA, M. A. Physiological response and productivity of safflower lines under water deficit and rehydration. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 89, n. 4, p. 3051-3066, 2017.
- BRAIN, P.; COUSENS, R. An equation to describe dose responses where there is stimulation of growth at low doses. **Weed Research**, v. 29, n. 2, p. 93-96, 1989.
- BRITO, I. P.; TROPALDI, L.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Hormetic effects of glyphosate on plants. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1064-1070, 2018.
- CANAVAR, O.; GOTZ, K. P.; KOCA, Y. O.; ELLMER, F. Relationship between water use efficiency and  $\delta^{13}C$  isotope discrimination of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under drought stress. **Turkish Journal of Field Crops**, v. 19, n. 2, p. 203-211, 2014.
- CARVALHO, L. B.; DUKE, S. O.; ALVES, P. L. C. A. Physiological responses of *Eucalyptus x urograndis* to glyphosate are dependent on the genotype. **Scientia Forestalis**, n. 118, p. 177-187, 2018.

CEDERGREEN, N.; RITZ, C.; STREIBIG, J. C. Improved empirical models describing hormesis. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 24, n. 12, p. 3166-3172, 2005.

CERVEIRA JUNIOR, W. R.; COSTA, Y. K. S.; CARBONARI, C. A.; DUKE, S.O.; ALVES, P. L. C. A.; CARVALHO, L. B. Growth, morphological, metabolic and photosynthetic responses of clones of eucalyptus to glyphosate. **Forest Ecology and Management**, v. 470, p. 118218, 2020.

DELSHAD, E.; YOUSEFI, M.; SASANNEZHAD, P.; RAKHSHANDEH, H.; AYATI, Z. Medical uses of *Carthamus tinctorius* L. (safflower): a comprehensive review from traditional medicine to modern medicine. **Electronic physician**, v. 10, n. 4, p. 6672, 2018.

DUKE, S. O.; POWLES, S. B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 319-325, 2008.

EMONGOR, V. Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the underutilized and neglected crop: a review. **Asian Journal of Plant Sciences**, v. 9, n. 6, p. 299-306, 2010.

FLEMMER, A. C.; FRANCHINI, M. C.; LINDSTRÖM, L. I. Description of safflower (*Carthamus tinctorius*) phenological growth stages according to the extended BBCH scale. **Annals of Applied Biology**, v. 166, n. 2, p. 331-339, 2015.

FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Ascorbate and glutathione: the heart of the redox hub. **Plant Physiology**, v. 155, n. 1, p. 2-18, 2011.

GOMES, M. P.; MANAC'H, L.; SARAH, G.; HÉNAULT-ETHIER, L.; LABRECQUE, M.; LUCOTTE, M.; JUNEAU, P. Glyphosate-dependent inhibition of photosynthesis in willow. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 207, 2017.

ISTANBULLUOGLU, A. Effects of irrigation regimes on yield and water productivity of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) under Mediterranean climatic conditions. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 12, p. 1792-1798, 2009.

LIAO, H.; LI, Y.; ZHAI, X.; ZHENG, B.; BANBURY, L.; ZHAO, X.; LI, R. Comparison of inhibitory effects of safflower decoction and safflower injection on Protein and mRNA expressions of iNOS and IL-1 $\beta$  in LPS-activated RAW264.7 Cells. **Journal of Immunology Research**, v. 2019, 2019.

MAXWELL, K.; JOHNSON, G. N. Chlorophyll fluorescence—a practical guide. **Journal of Experimental Botany**, v. 51, n. 345, p. 659-668, 2000.

MOLLAEE, M.; MOBILI, A.; CHAUHAN, B. S. The response of glyphosate-resistant and glyphosate-susceptible biotypes of *Echinochloa colona* to carbon dioxide, soil moisture and glyphosate. **Scientific Reports**, v. 10, 2020.

- MORAES, C. P.; BRITO, I. P. F. S.; TROPALDI, L.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D. Hormetic effect of glyphosate on *Urochloa decumbens* plants. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 55, n. 4, p. 376-381, 2020.
- NASCENTES, R. F.; CARBONARI, C. A.; SIMÕES, P. S.; BRUNELLI, M. C.; VELINI, E. D.; DUKE, S. O. Low doses of glyphosate enhance growth, CO<sub>2</sub> assimilation, stomatal conductance and transpiration in sugarcane and eucalyptus. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1197-1205, 2018.
- PINCELLI-SOUZA, R. P.; BORTOLHEIRO, F. P. A. P.; CARBONARI, C. A.; VELINI, E. D.; SILVA, M. A. Hormetic effect of glyphosate persists during the entire growth period and increases sugarcane yield. **Pest Management Science**, v. 76, n. 7, p. 2388-2394, 2020.
- QUEIROGA, V. P.; GIRÃO, E. G. E.; ALBUQUERQUE, E. M. V. **Cártamo (*Carthamus tinctorius* L.): Tecnologia de plantio e utilização**. Boletim Técnico, 1<sup>o</sup> ed. Embrapa, pp 11-12, 2021.
- SCHABENBERGER, O.; THARP, B. E.; KELLS, J. J.; PENNER, D. Statistical tests for hormesis and effective dosages in herbicide dose response. **Agronomy Journal**, v. 91, n. 4, p. 713-721, 1999.
- SILVA, J. C.; GERLACH, G. A. X.; RODRIGUES, R. A. F.; A. R. F, O. The impact of water regimes on hormesis by glyphosate on common bean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 2, p. 237, 2016.
- SILVA, M. A.; ARAGAO, N. C.; BARBOSA, M. A.; JERONIMO, E. M.; CARLIN, S. D. Efeito hormótico de glyphosate no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 68, n. 4, p. 973-978, 2009.
- SILVA, M. A.; JIFON, J. L.; SANTOS, C. M.; JADOSKI, C. J.; SILVA, J. A. G. Photosynthetic capacity and water use efficiency in sugarcane genotypes subject to water deficit during early growth phase. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 56, n. 5, p. 735-748, 2013.
- VELINI, E. D.; ALVES, E., GODOY, M. C.; MESCHÉDE, D. K.; SOUZA, R. T.; DUKE, S. O. Glyphosate applied at low doses can stimulate plant growth. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 489-496, 2008.
- ZONG-JIN, P.; SHI-JUN, Y.; GUI-SHENG, Z.; HUI, Y.; XU-QIN, S.; ZHEN-HUA, Z.; SHENG-LIANG, H.; GUO-PING, P.; YAN-YAN, C.; JI-QING, B.; XIAO-PING, W.; SHU-LAN, S.; YU-PING, T.; JIN-AO, D. The comprehensive evaluation of safflowers in different producing areas by combined analysis of color, chemical compounds, and biological activity. **Molecules**, v. 24, n. 18, p. 3381, 2019.