



RAFAELA CARVALHO DE SOUZA

**ECOTOXICIDADE DE HERBICIDAS À BASE DE
NICOSULFURON E S-METOLACHLOR:
UMA ABORDAGEM COMPARATIVA ENTRE MODELOS
VEGETAIS**

**LAVRAS – MG
2023**

RAFAELA CARVALHO DE SOUZA

**ECOTOXICIDADE DE HERBICIDAS À BASE DE NICOSULFURON E S-
METOLACHLOR:
UMA ABORDAGEM COMPARATIVA ENTRE MODELOS VEGETAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada, área de concentração em Botânica Aplicada, para a obtenção do título de Mestre.

Dra. Larissa Fonseca Andrade Vieira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

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

De Souza, Rafaela Carvalho.

Ecotoxicidade de Herbicidas à base de Nicosulfuron e S-
Metolachlor: Uma abordagem comparativa entre modelos vegetais /
Rafaela Carvalho De Souza. - 2023.

58 p.

Orientador(a): Larissa Fonseca Andrade Vieira.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Pesticidas. 2. Poluição. 3. Ecotoxicologia. I. Andrade Vieira,
Larissa Fonseca. II. Título.

RAFAELA CARVALHO DE SOUZA

**ECOTOXICIDADE DE HERBICIDAS À BASE DE NICOSULFURON E S-METOLACHLOR:
UMA ABORDAGEM COMPARATIVA ENTRE MODELOS VEGETAIS**

**ECOTOXICITY OF NICOSULFURON AND S-METOLACHLOR-BASED
HERBICIDES:
A COMPARATIVE APPROACH BETWEEN PLANT MODELS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada, área de concentração em Botânica Aplicada para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de janeiro de 2023
Dra. Larissa Fonseca Andrade Vieira - UFLA
Dr. Evaristo Mauro de Castro - UFLA
Dr. Raphael Baston de Souza - UNICAMP

Dra. Larissa Fonseca Andrade Vieira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2023**

*Em memória às eternas professoras,
Alba Stela de Rezende Bastos,
Mara das Graças Lasmar Carvalho
e Mariolange Botelho.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

À Deus e sua Natureza;

À minha família, pelo apoio e amor.

Aos meus amigos, pela presença e afeto.

À minha orientadora pela paciência e ensinamentos.

A todos os membros, desde alunos, técnicos e professores do Programa de Pós-Graduação em Botânica Aplicada.

Aos meus colegas do Laboratório de Eco(genotoxicologia e Citogenética pela convivência diária e aprendizado.

A todos os professores que me instruíram desde a pré-escola até a pós-graduação.

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

E a Universidade Federal de Lavras, pela oportunidade.

Agradeço.

*“Além de um ato de conhecimento,
a educação é também um ato político.”*
Paulo Freire

RESUMO

Estudos têm sido realizados para avaliar os efeitos dos herbicidas no ecossistema devido à crescente preocupação com os impactos ambientais causados por sua ampla aplicação na agricultura. Nicosulfuron é um herbicida usado para controle pós-emergente de gramíneas anuais ou perenes e ervas daninhas de folha larga. O S-Metolachlor é conhecido por ser usado como um herbicida de pré-emergência usado principalmente para controlar gramíneas anuais e algumas ervas daninhas de folha larga em culturas intensivas. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de dois herbicidas, um à base de Nicosulfuron e outro à base de S-Metolachlor no desenvolvimento inicial das plantas modelos *Lactuca sativa* L. (alface), *Raphanus sativus* (rabanete), *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br (milheto) e *Triticum aestivum* (trigo) por meio de bioensaios macroscópicos de germinação e desenvolvimento inicial de plântulas. Dentre os quatro modelos avaliados, *L. sativa* apresentou maior sensibilidade quanto à porcentagem de germinação quando exposta ao herbicida à base de Nicosulfuron, seguida por *T. aestivum*, *R. sativus* e *P. glaucum*. O mesmo é observado para o índice de velocidade de germinação. Para o herbicida à base de S-Metolachlor, o modelo que apresentou maior sensibilidade foi *T. aestivum*, seguido de *R. sativus*, *L. sativa* e *P. glaucum* sendo o modelo menos sensível. Em relação ao desenvolvimento inicial das plântulas, o modelo *P. glaucum* apresentou maior sensibilidade e *L. sativa* apresentou menor sensibilidade no desenvolvimento radicular quando expostos ao herbicida à base de Nicosulfuron. Já os modelos *R. sativus* e *L. sativa* apresentaram maior e menor sensibilidade, respectivamente, quando expostos ao herbicida à base de S-Metolachlor quando avaliado o crescimento radicular. Considerando o desenvolvimento da muda como um todo, o modelo que apresentou maior sensibilidade quando exposto ao herbicida à base de Nicosulfuron foi *T. aestivum*, e quando exposto ao S-Metolachlor, *P. glaucum*. O modelo *R. sativus* apresentou menor sensibilidade a ambos os herbicidas ao avaliar o parâmetro de desenvolvimento da parte aérea das plântulas.

Palavras-chave: Pesticida. Poluição. Germinação. Ecotoxicologia. Agroquímico

ABSTRACT

Studies have been conducted to evaluate the effects of herbicides on the ecosystem due to growing concerns about the environmental impacts caused by their extensive application in agriculture. Nicosulfuron is an herbicide used for post-emergent control of annual or perennial grasses and broadleaf weeds. S-metolachlor is known to be used as a pre-emergence herbicide used mainly to control annual grasses and some broadleaf weeds in intensive crops. The objective of this work was to evaluate the effects of two herbicides, one based on Nicosulfuron and the other based on S-Metolachlor on the initial development of the plant models *Lactuca sativa* L. (lettuce), *Raphanus sativus* (radish), *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br (millet), and *Triticum aestivum* (wheat) through macroscopic bioassays of germination and initial seedling development. Among the four models evaluated, *L. sativa* showed higher sensitivity regarding germination percentage when exposed to Nicosulfuron-based herbicide followed by *T. aestivum*., *R. sativus* and *P. glaucum*. The same is observed for the germination speed index. For the herbicide based on S-Metolachlor, the model that showed the highest sensitivity was *T. aestivum*, followed by *R. sativus*, *L. sativa* and *P. glaucum* being the least sensitive model. Regarding initial seedling development, the models *P. glaucum* showed higher sensitivity and *L. sativa* showed lower sensitivity in root development when exposed to the herbicide based on Nicosulfuron. Whereas, the *R. sativus* and *L. sativa* models showed higher and lower sensitivity, respectively, when exposed to the S-Metolachlor-based herbicide when root growth was evaluated. Considering the seedling development as a whole, the model that showed higher sensitivity when exposed to Nicosulfuron-based herbicide was *T. aestivum*, and when exposed to S-Metolachlor, *P. glaucum*. The model *R. sativus* showed less sensitivity to both herbicides when evaluating the parameter of development of the aerial part of the seedlings.

Key-words: Pesticide. Pollution. Germination. Ecotoxicology. Agrochemical

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	10
1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	Toxicologia Ambiental	12
2.2	Herbicidas: o que são e seu impacto ao ambiente	13
2.2.1	Nicosulfuron	14
2.2.2	S-Metolachlor	18
2.3	Importância dos ensaios biológicos utilizando modelos vegetais para acesso de risco de contaminação ambiental	23
2.4	A semente: aspectos gerais e germinação	24
	REFERÊNCIAS	26
	SEGUNDA PARTE – ARTIGO	36
	ECOTOXICIDADE DE HERBICIDAS À BASE DE NICOSULFURON E S-METOLACHLOR:	36
1	INTRODUÇÃO	38
2	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3	RESULTADOS	42
4	DISCUSSÃO	51
	REFERÊNCIAS	55

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A partir da Segunda Guerra Mundial, os estudos no campo da toxicologia ganharam maior impulso, principalmente por causa do incremento no uso de uma grande variedade de substâncias e compostos químicos (SISINNO, 2021) que podem ser caracterizados desde pouco nocivos até aqueles com um alto grau de toxicidade. Tais substâncias são utilizadas em grande escala na agricultura desde a ascensão da Revolução Verde em 1960, caracterizada pelo grande aumento da produção agrícola e intensa utilização de praguicidas (PINGALI, 2012; JOHN; BABU, 2021).

De acordo com Banks (2008), atualmente a poluição causada pelos praguicidas é um dos distúrbios antropogênicos mais persistentes, penetrantes e preocupantes nas comunidades biológicas e segundo o Ministério da Saúde (2018), o uso contínuo, indiscriminado ou inadequado de agrotóxicos é considerado um relevante problema ambiental e de saúde pública.

Outra problemática que intensifica a poluição do planeta é o significativo crescimento populacional que favorece diretamente a expansão da cadeia produtiva em função do maior consumo de produtos agrícolas e industrializados, elevando consideravelmente a quantidade de resíduos produzidos pelo homem (GUIMARÃES, 2009 e SCHIRMER 2010). Esse aumento vem ocasionando diversos problemas, por sua inserção nos diferentes ecossistemas e com consequentes efeitos indesejados sobre os organismos vivos, inclusive o ser humano (LIMA *et al.*, 2007). Muitos dos efeitos observados incluíram mortes, doenças, desaparecimento de espécies, e desequilíbrio na dinâmica natural dos ecossistemas (SISINNO, 2013). Diante disso, é inevitavelmente a preocupação com a contaminação ambiental que aumentou significativamente nos últimos anos em virtude da grande quantidade de substâncias tóxicas que vêm sendo lançadas no ambiente (LIMA, 2010; VIANNA, 2015; UKAOGO, EWUZIE, ONWUKA, 2020).

Desde a modernização da agricultura, inúmeros agroquímicos com funções e características diversas foram introduzidos ao ambiente. Os agroquímicos ou pesticidas, são substâncias químicas, físicas e biológicas que tem como função, o extermínio de pragas determinadas pela agricultura convencional, e são classificados de acordo com seus alvos biológicos, por exemplo, plantas (herbicidas), insetos (inseticidas) e fungos (fungicidas) entre outros organismos que afetam negativamente a produção agrícola (WALTER, 2002) e atualmente foram desenvolvidos pesticidas para disseminar outros organismos prejudiciais para a agricultura cujo seus alvos biológicos são os nematóides (nematicidas), moluscos

(moluscidas), rodenticidas (roedores), acaricidas (ácaros) e outros produtos que favorece a manutenção da produção agrícola (CASSAL *et al.*, 2014).

O uso excessivo de agroquímicos podem potencializar o risco de contaminação, pois, após aplicados, podem lixiviar e afetar águas superficiais e lençóis freáticos. E, como consequência, a biota local também é afetada, o que pode acarretar danos a organismos não alvos destes defensivos. Traços desses defensivos podem permanecer nos alimentos, mesmo após a colheita, o que pode ocasionar a ingestão de substâncias potencialmente tóxicas pelo homem (CARSON, 2010). Os herbicidas, pesticidas utilizados para controle de ervas daninhas nas culturas agrícolas, são os mais utilizados em todo o mundo e se encontram entre as substâncias mais preocupantes do ponto de vista ambiental, isso devido às suas características de mobilidade no solo, sendo frequentemente detectados em águas subterrâneas (SISINNO, 2013).

Dentre os herbicidas mais utilizados pela agricultura convencional, temos o Nicosulfuron. É um herbicida pertencente ao grupo químico das sulfoniluréia utilizado para o controle seletivo de pós-emergência de gramíneas anuais e perenes (REGITANO e KOSKINEN, 2008) e algumas dicotiledôneas na cultura do milho (CAVALIERI *et al.*, 2008; WANG *et al.*, 2018). É um herbicida amplamente utilizado em todo o mundo que apresenta riscos potenciais de contaminação ambiental, bem como problemas de fitotoxicidade que levantam preocupações crescentes. Além disso, é considerado relativamente móvel no solo, com riscos de escoamento e lixiviação para águas superficiais e subterrâneas (TRIGO *et al.*, 2014; DUGANDŽIĆ *et al.*, 2017) e possui toxicidade residual para culturas rotativas (LIU *et al.*, 2012).

Outro herbicida utilizado pela agricultura convencional e que apresenta uma considerável preocupação ambiental é o S-Metolachlor. É comumente utilizado pela produção agrícola, sendo um herbicida da família das cloroacetanilidas, que atua como um inibidor da formação de ácidos graxos de cadeia muito longa e é amplamente utilizado como herbicida de pré-emergência para o controle de gramíneas e algumas ervas daninhas de folhas largas em uma ampla gama de culturas, como milho, beterraba sacarina, algodão, tomate, batata, tabaco, soja e girassol (TANETANI *et al.*, 2011; WOŁEJKO *et al.*, 2017). Embora o S-Metolachlor seja classificado como moderadamente tóxico (Classe III) (EDITION, 2011; ANVISA, 2014), seu impacto negativo em microrganismos aquáticos como fitoplâncton (THAKKAR, 2013), peixes (QUINTANEIRO *et al.*, 2017) e crustáceos (MAI, 2013), bem como em certos tipos de células

humanas (HARTNETT, 2013) foi observado, sendo considerado uma molécula potencialmente perigosa para o meio ambiente (DEMAILLY *et al.*, 2019).

Os ensaios biológicos, também chamados de bioensaios, são ferramentas para acessar o risco ecotoxicológico de poluentes ambientais, incluindo herbicidas (LUTTERBECK *et al.*, 2015). Vários modelos biológicos estão disponíveis para tal fim e, as plantas são consideradas excelente organismos-teste (PALMIERI *et al.*, 2014; DOS REIS *et al.*, 2017) uma vez que os ensaios que se baseiam em modelos vegetais são rápidos, fáceis de serem conduzidos, , simples, confiáveis, e econômicos (ANDRADE-VIEIRA *et al.*, 2014). Além disso, não necessitam de aprovação em comissões éticas como no caso dos bioensaios com modelos animais e ainda apresentam respostas equivalentes a ensaios com células humanas (REIS *et al.*, 2017). Em suma, as plantas compõem um importante grupo de bioindicadores de poluição seja para monitoramento *in situ*, no ambiente natural, ou *ex-situ* em condições experimentais em laboratório, e vêm sendo utilizadas há bastante tempo para este fim (SANDALIO *et al.*, 2001).

Diante do exposto, esse trabalho tem como objetivo avaliar a ecotoxicidade da formulação comercial de dois herbicidas, à base de Nicosulfuron e de S-metolachlor, utilizando bioensaios com quatro modelos vegetais para contribuir com o conhecimento na ecotoxicologia desses herbicidas no ambiente e realizar uma abordagem comparativa entre eles.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Toxicologia Ambiental

Com a problemática em torno da poluição ambiental advindo de inúmeros contextos históricos como a Revolução Industrial, no século XIX, que foi responsável pela industrialização e pelo aumento da população global e a Revolução Verde que se iniciou na década de 60 na América, que contribuiu diretamente na intensificação da produção agrícola e, conseqüente, aumentou a utilização de pesticidas para que a demanda da população global fosse atendida, muitos compostos nocivos foram introduzidos no planeta (CARSON, 2010). O uso indevido e indiscriminado de tais substâncias acarretou inúmeras conseqüências devido às suas propriedades cancerígenas, mutagênicas e apresentam efeitos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente (SINGH; SHARMA; GUPTA, 2009).

Dentre os resíduos de substâncias nocivas presentes no planeta estão os agroquímicos que são utilizados pela agricultura convencional. Estima-se que por ano seja utilizado cerca de aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de agroquímicos no mundo e no Brasil, cerca de 300 toneladas no ano (EMBRAPA, 2021). Tais dados trazem uma preocupação em termos

ambientais, pois é visto de que resíduos dessas substâncias estão presentes em todo o ecossistema, como o solo (MANDAL, 2020), as águas superficiais e subterrâneas (PAVLIDIS, 2018), alimentos (WIMALAWANSA & WIMALAWANSA, 2014), biota (PASTOR *et al.*, 1996; ALMEIDA, 2021) e nos seres humanos (ELAHI *et al.*, 2020). Ou seja, é visto que essas substâncias afetam todos os níveis tróficos, pois tem capacidade de bioacumular em organismos no decorrer do tempo e impactam espécies não-alvos (OU-YANG *et al.*, 2022).

É observado em Meena (2020), que o uso indiscriminado de pesticidas leva à degradação dos ecossistemas microbianos do solo. Mais de 95% dos herbicidas aplicados e 98% dos inseticidas atingem microrganismos não-alvos presentes no solo do que seu organismoalvo, isso devido ao fato que tais substâncias são pulverizadas proporcionalmente em todo o campo, independentemente das áreas afetadas (MILLER, 2014). Os resíduos de agroquímicos quando aplicados no solo podem lixiviar em períodos com alta taxa de precipitação e atingir águas superficiais e subterrâneas (VARCA, 2002; DABROWSKI *et al.*, 2009) e a capacidade de absorção de um pesticida determina se ele será lixiviado para águas superficiais ou não, portanto, pesticidas com má adsorção ou absorção na superfície do solo irão lixiviar para as para as águas subterrâneas e a assim, causar a contaminação das águas (AGRAWAL *et al.*, 2010).

Existem inúmeros relatos sobre a contaminação das águas superficiais e subterrâneas por resíduos de pesticidas (LI, *et al.*, 2013; DUGANDZIC *et al.*, 2017; ZHANG *et al.*, 2020; MARIN-BENITO *et al.*, 2021), entre eles os herbicidas à base de Nicosulfuron e o S-Metolachlor.

2.2 Herbicidas: o que são e seu impacto ao ambiente

A poluição causada pelos praguicidas é um dos distúrbios antropogênicos mais persistentes e penetrantes nas comunidades biológicas (BANKS *et al.*, 2008). E a aplicação de praguicidas é extremamente comum para melhorar a produtividade na agricultura (MIKÓ *et al.*, 2015), tanto nos países mais desenvolvidos, quanto nos em desenvolvimento, apesar dos esforços para conscientização sobre os riscos e para a redução do uso deles (BANKS *et al.*, 2008). O Brasil é apontado como o país que mais utiliza agrotóxicos proibidos em países que têm ampla preocupação com o meio ambiente (ALVARENGA, 2017).

Dentre os agroquímicos utilizados nas lavouras, os herbicidas são usados para eliminar as ervas daninhas e representam cerca de 60% dos praguicidas usados na agricultura em todo o mundo (MARÍN-BENITO *et al.*, 2021).

Os herbicidas são substâncias químicas sintéticas, utilizados no controle das ervas daninhas das culturas, que promovem o controle e a morte das pragas. Para isso, esses compostos atuam de diferentes maneiras, como a inibição da fotossíntese e da síntese de pigmentos, da formação de aminoácidos e da síntese lipídica, bloqueando a divisão celular e, conseqüentemente, inibindo o crescimento das plantas alvo (DE SOUZA *et al.*, 2020). Além disso, podem afetar a fisiologia, diminuindo o sucesso reprodutivo, interrompendo as funções endócrinas e têm efeitos imunotóxicos em organismos não-alvos. Dessa forma, os praguicidas e seus resíduos podem impactar negativamente a existência das espécies e, em última instância, a biodiversidade (MIKÓ *et al.*, 2015). São compostos classificados como tóxicos para os organismos vivos e possuem propriedades genotóxicas, mutagênicas e carcinogênicas, mesmo quando utilizados em baixas concentrações (BOLOGNESE E MORASSO, 2000; FERNANDES; MAZZEO; MARIN-MORALES, 2009).

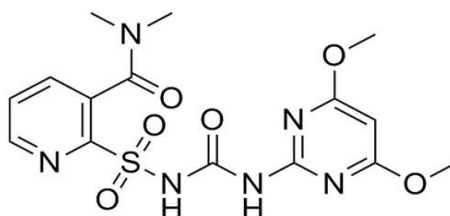
A poluição do solo e da água resultante do uso a longo prazo de herbicidas de sulfonilureia tem recebido atenção considerável (SIKKEMA *et al.*, 2006; ROSENBOM & OLSEN, 2010). Além da utilização de herbicidas causarem poluição no ambiente e de serem potencialmente tóxicos para organismos não-alvos, há evidências de que a exposição a pesticidas aumenta o risco de certos tipos de câncer em humanos (DICH, *et al.*, 1997) incluindo o câncer infantil (ZAHM; WARD, 1998). Herbicidas de fenoxiácidos, em alguns estudos epidemiológicos, foram associados ao aumento do risco de STS (síndrome de choque tóxico estafilocócico), linfoma maligno e leucemia (HARDELL; ERIKSSON; DEGERMAN, 1994). Também estão relacionados à casos de intoxicação aguda, incluindo tentativas de suicídio, intoxicação em massa por alimentos contaminados, acidentes químicos na indústria e exposição ocupacional na agricultura, constituem o perigo mais grave para a saúde humano associado aos pesticidas usados para fins agrícolas (WHO, 1990).

2.2.1 Nicosulfuron

O Nicosulfuron N6(2-[(4,6-dimethoxypyrimidin-2-ylcarbamoil) sulfamoyl]-N,N-dimethylnicotinamide) (C₁₅H₁₈N₆O₆S) pertence ao grupo químico das sulfoniluréias possuindo em sua molécula anéis de piridina e pirimidina ligados à uma ponte de sulfoniluréia (CAVALIERI *et al.*, 2008; DUGANDŽIĆ *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2020) (Figura 1). Foi introduzido no mercado de milho nos EUA em 1990 (CAREY; PENNER; KELLS, 1997) e desenvolvido pela ISK Corporation (JOLY *et al.*, 2013). É utilizado no

controle de pós-emergência de ervas daninhas gramíneas anuais ou perenes e ervas daninhas de folhas largas (WANG, *et al.*, 2018; ZHANG *et al.*, 2020).

Figura 1 - Estrutura química do Nicosulfuron



Fonte: NICOSULFURON. **Axios Research**, 2022. Disponível em: <<https://www.axios-research.com/products/nicosulfuron>>. Acesso em: 28 de outubro de 2022.

Os herbicidas a base de Sulfoniluréias são conhecidos por possuírem um mecanismo de ação que atua na inibição do crescimento e a divisão das células vegetais reprimindo a enzima acetolactato sintase (ALS), também conhecida como aceto hidroxíácido sintase (AHAS) e inibindo a biossíntese de aminoácidos de cadeia ramificada (valina, leucina e isoleucina), que eventualmente levam à morte de toda a planta (JIN *et al.*, 2012; DÉLYE *et al.*, 2018). A enzima ALS atua regulando a biossíntese desses aminoácidos de acordo com a demanda da utilização na síntese de proteínas e da quantidade dos mesmos (CAREY; PENNER; KELLS, 1997; CAVALIERI *et al.*, 2008; DE OLIVEIRA JR; CONSTANTIN; INOUE, 2011; DIYANAT; GHASEMKHAN GHAJAR, 2020; THIOUR-MAUPRIVEZ *et al.*, 2019).

A ação do Nicosulfuron resulta em uma rápida interrupção da divisão celular e crescimento de plantas vulneráveis. O desenvolvimento pode ser retardado ou inibido horas após o contato do herbicida, porém pode levar mais tempo para desenvolver sintomas físicos no campo. É observado que os herbicidas à base de sulfoniluréias causam certa fitotoxicidade em algumas culturas sensíveis. Alguns sintomas de fitotoxicidade induzida apresentados incluem displasia, raízes curtas, clorose e folhas encaracoladas. (LEADEN; CASTANO; BEDMAR, 1996; ZHANG *et al.*, 2021)

Vários relatórios mostraram que os resíduos de herbicidas influenciam a atividade e a diversidade de micróbios do solo e aumentam a resistência de plantas daninhas (THAYER, *et al.*, 2012). Embora o nicosulfuron seja usado nas culturas em baixa dose agrônômica, a molécula é frequentemente observada em águas superficiais e subterrâneas porque o nicosulfuron é mais persistente do que outros herbicidas de sulfonilureia como rimsulfuron e sulfosulfuron (DUNN, 2005) devido a sua alta mobilidade no solo (ZHANG *et al.*, 2012)

Estudos já investigaram o destino e o comportamento do nicosulfuron no ambiente natural e mostraram que os herbicidas de sulfonilureia são degradados por meio de fotólise (TER HALLE; LAVIEILLE; RICHARD, 2010), hidrólise química (SABADIE, 2002; ZHANG *et al.*, 2013; FENG *et al.*, 2017) e degradação microbiana (SABADIE, 2002; BOTTARO *et al.*, 2008; MA *et al.*, 2009, ZHANG *et al.*, 2012; CARLES *et al.*, 2017). Contudo, sabe-se que a fotólise de herbicidas de sulfonilureia ocorre apenas na superfície do solo, e a hidrólise química limita-se à degradação em solos ácidos e neutros, sendo a eficiência de degradação menor em solução aquosa (BERGER & WOLFE, 1996; WANG *et al.*, 2010).

Foi observado que a presença do Nicosulfuron no ambiente pode afetar organismos não-alvos, como os seres vivos. Embriões de anfíbios que foram expostos a concentrações subletais desse herbicida tiveram seu desenvolvimento embrionário retardado e apresentaram má formação além de induzir efeitos teratogênicos (CHERON; COSTANTINI; BRISCHOUX; 2022) e efeitos de desenvolvimento no processo de organogênese da espécie *Xenopus laevis* (FORT, *et al.*, 1999).

Insetos também são afetados pela ação tóxica do Nicosulfuron. Abelhas (*Apis mellifera* spp.) são afetadas quando expostas em múltiplas combinações desse herbicida, sendo mais tóxicos e de alto risco para a espécie *Trichogramma ostrinae*, uma mariposa noturna considerada pela agricultura convencional uma praga da cultura do milho (YONG, *et al.*, 2018) e em percevejos (MENEZES, *et al.*, 2012). Em crustáceos (*Ceriodaphnia affinis*) foi observado que o herbicida apresentou efeito embriotóxico causando a redução da fertilidade nesse organismo modelo (SHCHERBAN, *et al.*, 2016) (Quadro 1 e 2).

Quadro 1 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de Nicosulfuron em diferentes modelos terrestres (Continua).

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETRO AVALIADO
Ecotoxicologia Terrestre			
Animal - anfíbio	<i>Bufo spinosus</i>	CHERON; COSTANTINI; BRISCHOUX, 2022	Desenvolvimento embrionário

Quadro 1 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de Nicosulfuron em diferentes modelos terrestres (Conclusão).

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETRO AVALIADO
Animal - invertebrado	<i>Eisenia andrei</i> (minhoca)	DE SANTO et al., 2018	Letalidade
	<i>Folsomia candida</i> (collembola)	DE SANTO et al., 2018	Letalidade
	<i>Apis mellifera</i> (abelha), <i>Podisus nigrispinus</i> (percevejo)	YONG, et al., 2018; DE CASTRO MONTEIRO et al., 2019; REIS et al., 2018; YANFENG; HUILI, 2020, MU et al., 2022	Toxicidade Aguda; Reprodução
	<i>Helicoverpa zea</i> (lagarta)	MASSA; BLEVINS; CHAO, 2008	Toxicidade Aguda
	<i>Achatina fulica</i> (caracol)	PHACELI et al., 2021	Reprodução
Vegetal - plantas não-alvo	<i>Oryza sp.</i> (arroz); <i>Zea Mays</i> (milho), <i>Phaseolus vulgaris</i> (feijão)	SILVA et al, 2020; ESQUEDA et al., 2000; JAKELAITIS et al., 2005	Crescimento e desenvolvimento do corpo vegetal

Fonte: Do autor (2023)

Quadro 2 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de Nicosulfuron em diferentes modelos aquáticos.

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETRO AVALIADO
Ecotoxicologia Aquática			
Animal - peixe	<i>Carassius auratus</i> (peixe dourado)	BRETAUD; TOUTANT; SAGLIO, (2000); SAGLIO et al., (2003)	Respostas comportamentais
Algas	<i>Chlorella vulgaris</i> , <i>Navicula accommoda</i> , <i>Oscillatoria limnetica</i>	LEBOULANGER et al., 2001; SEGUIN et al., 2001; SEGUIN; DRUART; LE COHU, (2001)	Reprodução

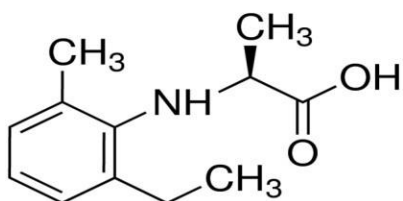
Fonte: Do autor (2023)

Diante disso, por esse agroquímico possuir uma alta atividade herbicida, necessitar uma baixa dose para a aplicação, ter um amplo espectro de ação e baixa toxicidade em mamíferos, o Nicosulfuron é amplamente utilizado no mundo. No entanto, há uma grande preocupação relacionados aos riscos potenciais de contaminação ambiental, além de problemas relacionados à fitotoxicidade do mesmo levantam preocupações crescentes quanto a sua utilização (ZHAO *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2020).

2.2.2 S-Metolachlor

O herbicida S-Metolachlor é pertencente à família das cloroacetamidas sendo um composto não-iônico e enantiômero ativo da molécula de metolachlor. Possui nome químico 2-cloro-N-(2-etil-6-metilfenil)-N-[(1S)-2-metoxi-1-metiletil] acetamida (JOLY *et al.*, 2013; DEMAILLY *et al.*, 2019) e foi desenvolvido pela Ciba-Geigy sendo comercializado pela Syngenta Agro SAS em 1997 e comercializado pela primeira vez no Brasil em 1998 (ZEMOLIN *et al.*, 2014) (Figura 2).

Figura 2 - Estrutura química do S-Metolachlor.



Fonte: S-METOLACHLOR. Merck KGaA, 2022. Disponível em: <<https://www.sigmaaldrich.com/BR/pt/product/sial/32648>>. Acesso em: 28 de outubro de 2022.

O S-Metolachlor é conhecido por ser utilizado como uma herbicida de pré-emergência usado principalmente para controlar gramíneas anuais e algumas ervas daninhas de folhas largas em culturas intensivas como girassol, milho, soja e batata (EFSA, 2012; ZEMOLIN *et al.*, 2014; COPIN; PERRONET; CHÉVRE, 2016; RANGANI *et al.*, 2021) (Tabela 2).

É um composto quiral formado por 88% de S-enantiômero e 12% de R-enantiômero (COPIN; PERRONET; CHÉVRE, 2016; MARÍN-BENITO *et al.*, 2021) que proporciona o mesmo controle de plantas daninhas que o metolachloro (50% de S-enantiômero e 50% de R-enantiômero) (QU *et al.*, 2021).

Seu modo de ação consiste na inibição de elongases expressas pelo gene FAE1 envolvidas no alongamento de ácidos graxos altamente insaturados (HUFA) e especialmente ácidos graxos de cadeia muito longa (VLCFA) (TRENKAMP *et al.*, 2004) em membranas e compartimentos da parede celular que podem alterar sua função e integridade. Havendo a redução da rigidez e permeabilidade das células, a divisão celular é inibida e, conseqüentemente, prejudica o desenvolvimento da parte aérea em plantas susceptíveis (NEVES *et al.*, 2015; MARONIĆ *et al.*, 2018; DEMAILLY *et al.*, 2019). Além disso, o S-metolachlor tem potencial de inibição da biossíntese de inúmeras moléculas essenciais para o funcionamento do corpo vegetal, como proteínas, terpenóides e fenóis (MARONIĆ *et al.*, 2018). Segundo Neves *et al.*, (2018), afeta também outras vias metabólicas responsáveis pela transformação do geranylgeranyl pirofosfato em β -caroteno e α -caroteno, que podem acarretar uma tendência ao estresse oxidativo.

Sua toxicidade está ligada à oxidação de componentes das células aumentando a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS) e iniciando a peroxidação lipídica (MARONIĆ *et al.*, 2018). Espécies reativas de oxigênio alteram o funcionamento normal da célula podendo danificar biomoléculas essenciais como, lipídios, proteínas, ácidos nucleicos e pigmentos fotossintéticos, ocasionando, portanto, danos à membrana celular inativando a ação

de enzimas que afeta os processos fisiológicos e a viabilidade da célula (MARONIC *et al.*, 2018; DEMAILLY *et al.*, 2019)

Já foi detectado a presença desse herbicida em águas superficiais e costeiras (ROZMÁNKOVÁ *et al.*, 2020) e em águas subterrâneas em inúmeros países. Portanto, pode facilmente contaminar águas subterrâneas (MARÍN-BENITO *et al.*, 2021) e as águas superficiais com o escoamento agrícola (ROZMÁNKOVÁ *et al.*, 2020). E, de acordo com Neves *et al.*, 2015, o S-metolachlor também pode ser moderadamente tóxico para animais aquáticos (Quadro 3 e 4).

Quadro 3 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de S-Metolachlor em diferentes modelos terrestres (Continua).

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETRO AVALIADO
Ecotoxicologia Terrestre			
Animal – anfíbio	<i>Pelophylax perezi</i> (rã-verde)	QUINTANEIRO, SOARES; MONTEIRO, 2018	Mortalidade, desenvolvimento e desenvolvimento embrionário
Animal - invertebrado	Microorganismos do solo, <i>Bombyx mori</i> L (lagarta), <i>Eisenia foetida</i> (minhoca), <i>Euglypha rotunda</i> (ameba)	ZHOU; LIU; YE, 2006; ZHAN et al., 2006; Xu; Wen; Wang, 2010; XU; WEN; WANG, 2010, AMACKER, et al., 2018	Eficiência da respiração microbiana, eficiência metabólica, desenvolvimento corporal, reprodução

Quadro 3 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de S-Metolachlor em diferentes modelos terrestres (Conclusão).

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETRO AVALIADO
Ecotoxicologia Terrestre			
	<i>Triticum aestivum</i> L. (trigo); <i>Sorghum bicolor</i> L. Moench (sorgo), <i>Typha latifolia</i> (Linneaus); <i>Amaranthus dubius</i> , <i>Echinochloa</i> , <i>Cleome viscosa</i> , <i>Portulacaceae oleraceae</i> , <i>Digitaria spp.</i> <i>Echinochloa indica</i> , <i>Trianthema spp.</i> , <i>Brachiaria plantaginea</i> , <i>Brachiaria decumbens</i>	QU et al., 2021; ZHANG et al., 2022, MOORE; LOCKE, 2012; SANTOS et al., 2008	Crescimento e desenvolvimento

Fonte: Do autor (2023)

Quadro 4 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de S-Metolachlor em diferentes modelos aquáticos (Continua).

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETROS AVALIADOS
Ecotoxicologia Aquática			
Animal - peixe	<i>Danio rerio</i> (zebrafish)	NEVES et al., 2015; ROZMÁNKOVÁ et al., 2020, YANG et al., 2020; LIU et al., 2022, OU-YANG et al., 2022	Reprodução e sobrevivência

Quadro 4 - Principais trabalhos publicados que avaliam o efeito tóxico do herbicida à base de S-Metolachlor em diferentes modelos aquáticos (Conclusão).

TIPO DE ORGANISMO	ORGANISMO TESTE/ENSAIO	REFERÊNCIA	PARÂMETROS AVALIADOS
Ecotoxicologia Aquática			
Animal – Invertebrado	<i>Daphnia magna</i> (microcrustáceo), <i>Procambarus virginalis</i> (lagostim), <i>Eisenia foetida</i> (minhoca), <i>Daphnia longispina</i> (microcrustáceo), <i>Crassostrea gigas</i> (ostra)	LIU et al., 2006; STARA, et al., (2019); QUINTANEIRO et al., 2017; MAI et al., 2013; GAMAIN et al., 2017; VELISEK et al., 2019; VELISEK et al., 2018; LIU; YE; ZHAN; LIU, 2006	Mobilidade, reprodução, desenvolvimento
Algas	<i>Chlorella pyrenoidosa</i> , <i>Scenedesmus vacuolatus</i> , <i>Parachlorella kessleri</i> , <i>Gomphonema gracile</i>	LIU; XIONG, (2009); VALLOTTON aet al., 2008; MARONIĆ et al., 2018; DEMAILLY et al., 2019	Reprodução

Fonte: Do autor (2023)

Diante disso, a exposição direta e indireta deste herbicida é potencialmente perigosa ao meio ambiente (DEMAILLY *et al.*, 2019) sendo classificado como moderadamente tóxico (Classe III), pois seus resíduos foram classificados como persistentes pois possuem uma alta solubilidade em água. (GUELFY *et al.*, 2018; MARIN-BENITO *et al.*, 2021).

É visto que o S-metolachlor pode ser degradado no solos a partir da ação microbiana através de dois metabólitos principais que são persistentes e móveis no ambiente, sendo eles: ácido metolachloro oxanílico (MOA) e ácido metolachloro etassulfônico (MESA) (ROZMÁNKOVÁ *et al.*, 2020; MARÍN-BENITO *et al.*, 2021). A utilização desses produtos é prejudicial para o ecossistema pois possuem baixa adsorção no solo que pode comprometer a qualidade da água quando alcançam o lençol freático (GUELFY *et al.*, 2018).

2.3 Importância dos ensaios biológicos utilizando modelos vegetais para acesso de risco de contaminação ambiental

Em 1950-1960, a Toxicologia Ambiental recebeu atenção com o aumento da preocupação sobre os riscos que os produtos químicos agrícolas e industriais lançados no ambiente oferecem ao meio ambiente (AGATHOKLEOUS; CALABRESE, 2020). Os estudos em toxicologia ambiental têm por objetivo entender como agentes tóxicos podem afetar os organismos vivos (SISINNO, 2021).

Nas últimas décadas, a poluição ambiental aumentou drasticamente. A *World Health Organization* (WHO) estima que 8,9 milhões de pessoas morrem a cada ano de doenças causadas pela poluição, 8,4 milhões (94%) delas em países pobres (WHO, 2014). O impacto de poluentes presentes no ecossistema e na saúde humana é uma questão preocupante e internacional, visto que, existe um grande potencial de afetar a biota e os seres humanos (KUMAR; *et al.*, 2021; FALLAH *et al.*, 2021).

Diante da capacidade de poluentes ambientais de impactar o ecossistema, é de extrema importância compreender a dinâmica de tais substâncias. Para determinar a toxicidade de substâncias químicas no ambiente e acessar os riscos ecotoxicológicos das mesmas, é utilizado os bioensaios de toxicidade. Através dos bioensaios é possível investigar os possíveis efeitos e mecanismos de ação, além de compreender o potencial tóxico de poluentes ambientais (REPETTO *et al.*, 2001; WORTH, 2019).

As alterações causadas em organismos testes utilizados nos bioensaios detecta o potencial tóxico dos químicos presentes no ambiente (ALENGEBAWY, *et al.*, 2021) pois, organismos vivos respondem a níveis perigosos de qualquer substância química (TORRES RODRIGUEZ, 2003).

Os bioensaios utilizando plantas superiores apresentam vantagens por serem mais simples e de baixo custo (FISKESJÖ, 1985; GRANT, 1982), por não necessitar de aprovação em comissões éticas (ANDRADE-VIEIRA *et al.*, 2014) e ainda por apresentarem resultados que permitem inferir o real risco que o agente poluidor causa ao ambiente, inclusive mostrando-se tão eficientes quanto aos ensaios realizados em modelos animais (ÇELIK & ÄSLANTURK, 2007) inclusive células humanas (DOS REIS *et al.* 2017). Há uma vasta lista de bioensaios com modelos vegetais onde cada vegetal é usado para diferentes *endpoints* e objetivos. Os ensaios sobre a germinação de sementes e o crescimento radicular são utilizados frequentemente como *tier I* para prospecção de toxicidade. Esses ensaios são simples e envolvem a exposição de sementes de uma planta modelo a um agente potencialmente tóxico. Assim estabelece-se,

subsequentemente, a fitotoxicidade sobre o número de sementes germinadas, bem como a extensão do alongamento da raiz e da parte aérea (LIU *et al.*, 2012; PALMIERI *et al.*, 2014).

Os ensaios sobre a germinação e desenvolvimento inicial permitem a avaliação dos efeitos adversos de composto tóxico mesmo nos primeiros estágios do desenvolvimento da semente. Tanto o número de sementes germinadas quanto o alongamento da raiz são parâmetros sensíveis em testes de toxicidade, pois é um processo relativamente simples, rápido, confiável e economicamente viável (CHAN-KEB *et al.*, 2018).

Para realizar o teste, as sementes são expostas a um agente potencialmente tóxico. Após a exposição, o número de sementes germinadas, a extensão do alongamento da raiz e da parte aérea são estabelecidos (PARK *et al.*, 2016), sendo a avaliação do crescimento que constitui a medição da raiz e parte aérea são considerados mais sensíveis para detectar a toxicidade do composto químico utilizado (CARVALHO *et al.*, 2019). Tendo em vista que o crescimento radicular pode ser inibido quando o órgão é exposto à substância tóxica, e o crescimento e desenvolvimento da raiz estão diretamente relacionados a proliferação celular, se um composto é potencialmente tóxico, apresentará uma redução na divisão das células, que consequentemente, afetará o desenvolvimento da raiz (ANDRADE-VIEIRA *et al.*, 2017).

Diante disso, os bioensaios de toxicidade se tornam importantes nos eventos iniciais de desenvolvimento e sobrevivência de plantas, e, além disso, podem detectar qualquer substância capaz de gerar estresse na capacidade de germinação de sementes, crescimento das raízes e estabelecimento da matéria seca (PINHO *et al.*, 2017).

2.4 A semente: aspectos gerais e germinação

A semente é uma estrutura reprodutiva originada após a fecundação que contém um embrião com tecidos de reserva e envoltório (GOLDBERG; DE PAIVA; YADEGARI; 1994).

Uma semente madura e seca é considerada quiescente. Sementes quiescentes são considerados órgãos em repouso, geralmente apresentam baixo teor de umidade e com atividade metabólica quase estagnada. Para que ocorra a germinação, muitas sementes quiescentes precisam apenas ser hidratadas sob condições que suportem o metabolismo, por exemplo, uma temperatura adequada e a presença de oxigênio (BEWLEY *et al.*, 2012).

A embebição é o primeiro fator que desencadeia a germinação da semente, portanto, quando ocorre a hidratação da semente, o processo de germinação se inicia. Ocorre a rápida expansão do embrião, devido ao processo de hidratação, resultando na ruptura das camadas

adjacentes e na emergência da radícula. Diante disso, a germinação é considerada completa quando há a emergência da radícula (BEWLEY; BLACK, 2013)

Desde o desenvolvimento da semente até a conclusão da germinação, ocorre um fator crucial de extrema importância para esse processo, a interação mecânica entre os diferentes compartimentos da semente que estão relacionados ao fator de transcrição ZHOUP1, um gene que têm papel fundamental no desenvolvimento do embrião. O endosperma, as sementes e os revestimentos dos frutos são uma das principais restrições mecânicas à expansão do embrião (FOURQUIN *et al.*, 2016).

A germinação de sementes também depende de fatores ambientais que são essenciais para esse processo. A temperatura do ambiente, disponibilidade de luz, características do solo, pH e umidade são alguns dos fatores essenciais para germinação (JAIN & SINGH 1989; MACDONALD *et al.*, 1992).

REFERÊNCIAS

- ADEJORO, Solomon A.; ADEGAYE, Ajoke C.; SONOIKI, Doyinsola S. Soil microbial community response to compost addition to nicosulfuron contaminated soil. **Journal of Agricultural Studies**, v. 6, n. 4, p. 49-63, 2018.
- AGATHOKLEOUS, E.; CALABRESE, E. J. Environmental toxicology and ecotoxicology: How clean is clean? Rethinking dose-response analysis. **Science of The Total Environment**, p. 138769, 2020.
- AGRAWAL, A. N. J. U.; SHARMA, Bechan. Pesticides induced oxidative stress in mammalian systems. **Int J Biol Med Res**, v. 1, n. 3, p. 90-104, 2010.
- ALENGEBAWY, Ahmed et al. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. **Toxics**, v. 9, n. 3, p. 42, 2021.
- ALMEIDA, Carlos HS et al. Sublethal agrochemical exposures can alter honey bees' and Neotropical stingless bees' color preferences, respiration rates, and locomotory responses. **Science of the Total Environment**, v. 779, p. 146432, 2021.
- ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R.; DE NADAE, J. Risco tóxico e potencial perigo ambiental no ciclo de vida da produção de milho. **Espacios**, v. 38, n. 1, p. 12, 2017.
- ANDRADE-VIEIRA, L. F. et al. Effects of Jatropha curcas oil in Lactuca sativa root tip bioassays. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 86, n. 1, p. 373-382, 2014.
- ANDRADE-VIEIRA, Larissa Fonseca; PALMIERI, Marcel José; DAVIDE, Lisete Chamma. Effects of long exposure to spent potliner on seeds, root tips, and meristematic cells of Allium cepa L. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 10, p. 1-7, 2017.
- BANKS, J. E. et al. Time-varying vital rates in ecotoxicology: selective pesticides and aphid population dynamics. **Ecological Modelling**, v. 210, n. 1-2, p. 155-160, 2008.
- BERGER, B. M.; WOLFE, N. L. Hydrolysis and biodegradation of sulfonylurea herbicides in aqueous buffers and anaerobic water sediment systems: assessing fate pathways using molecular descriptors. **Environ. Toxicol. Chem.** 1996.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Agrotóxicos. **Ministério da Saúde**, Brasília [Internet]. 2018
- BOLOGNESI, Claudia; MORASSO, Gabriella. Genotoxicity of pesticides: potential risk for consumers. **Trends in Food Science & Technology**, v. 11, n. 4-5, p. 182-187, 2000.
- BOTTARO, M.; FRASCAROLO, P.; GOSETTI, F.; MAZZUCCO, E.; GIANOTTI, V.; POLATI, S.; POLLICI, E.; PIACENTINI, L.; PAVESE, G.; GENNARO, M. C. Hydrolytic and photoinduced degradation of tribenuron methyl studied by HPLC-DAD-MS/MS. **J. Am. Soc. Mass Spectrom.** 2008, 19, 1221–1229.

- CAREY, J. Boyd; PENNER, Donald; KELLS, James J. Physiological basis for nicosulfuron and primisulfuron selectivity in five plant species. **Weed Science**, v. 45, n. 1, p. 22-30, 1997.
- CARLES, L.; JOLY, M.; BONNEMOY, F.; LEREMBOURE, M.; DONNADIEU, F.; BATTISSON, I.; BESSE-HOGGAN, P. Biodegradation and toxicity of a maize herbicide mixture: mesotrione, nicosulfuron and S-metolachlor, **Journal of Hazardous Materials** (2010).
- CARSON, R. **Primavera Silenciosa** (Traduzido por Cláudia Sant'Ana Martins), São Paulo: Gaia, 2010
- CASSAL, Vivian Brusius et al. Agrotóxicos: uma revisão de suas consequências para a saúde pública. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, p. 437-445, 2014.
- CAVALIERI, S. D. *et al.* Tolerância de híbridos de milho ao herbicida Nicosulfuron. **Planta Daninha**, v26, n.1, p. 203-214, 2008.
- ÇELIK, T.A., ÄSLANTURK, Ö.S. Cytotoxic and genotoxic effects of *Lavandula stoechas* aqueous extracts. **Biologia**. Berlin, v. 62, n. 3, p. 292-296, 2007.
- CHAN-KEB, Carlos A. et al. Acute toxicity of water and aqueous extract of soils from Champotón river in *Lactuca sativa* L. **Toxicology reports**, v. 5, p. 593-597, 2018.
- CHERON, Marion; COSTANTINI, David; BRISCHOUX, François. Nicosulfuron, a sulfonylurea herbicide, alters embryonic development and oxidative status of hatchlings at environmental concentrations in an amphibian species. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 232, p. 113277, 2022.
- COPIN, Pierre-Jean; PERRONET, Léa; CHÈVRE, Nathalie. Modelling the effect of exposing algae to pulses of S-metolachlor: how to include a delay to the onset of the effect and in the recovery. **Science of the Total Environment**, v. 541, p. 257-267, 2016.
- DABROWSKI, J. M. et al. Agricultural impacts on water quality and implications for virtual water trading decisions. **Ecological economics**, v. 68, n. 4, p. 1074-1082, 2009.
- DE OLIVEIRA JR, Rubem Silvério; CONSTANTIN, Jamil; INOUE, Miriam Hiroko. Biologia e manejo de plantas daninhas. **Curitiba, Brasil: Omnipax**, 2011.
- DE SOUZA, Laurindo Pereira et al. Intoxicação parenteral por herbicida: estamos preparados para o cuidar? **Nursing (São Paulo)**, v. 23, n. 267, p. 4486-4501, 2020.
- DEVI, P. Indira; MANJULA, M.; BHAVANI, R. V. Agrochemicals, Environment, and Human Health. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 47, p. 399-421, 2022.
- DÉLYE, C.; DUHOUX, A.; GARDIN, J.A.C.; GOUZY J.; CARRÈRE, S. High conservation of the transcriptional response to acetolactate-synthaseinhibiting herbicides across plant species. **Weed Res** 58:2–7 (2018).

DEMAILLY, F. et al. Impact of diuron and S-metolachlor on the freshwater diatom *Gomphonema gracile*: Complementarity between fatty acid profiles and different kinds of ecotoxicological impact-endpoints. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 960-967, 2019.

DHANANJAYAN, V. et al. Agrochemicals impact on ecosystem and bio-monitoring. **Resources use efficiency in agriculture**, p. 349-388, 2020.

DICH, Jan et al. Pesticides and cancer. **Cancer causes & control**, v. 8, n. 3, p. 420-443, 1997.

DIYANAT, Marjan; GHASEMKHAN-GHAJAR, Fereidoon. Integrated weed control in corn (*Zea mays* L.) through combinations of seed priming and reduced dosages of various commonly used herbicides. **International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research**, v. 8, n. 3, p. 291-302.

DOS REIS, Gabriela Barreto et al. Reliability of plant root comet assay in comparison with human leukocyte comet assay for assessment environmental genotoxic agents. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 142, p. 110-116, 2017.

DUGANDŽIĆ, A. M. *et al.* Effect of inorganic ions, photosensitisers and scavengers on the photocatalytic degradation of nicosulfuron. **Journal of photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 336, p. 146-155, 2017.

DUNN, W. B.; ELLIS, D. I. Metabolomics: current analytical platforms and methodologies. **TrAC, Trends Anal. Chem.** 2005, 24, 285–294.

EFSA (European Food Safety Authority), 2012. Review of the existing maximum residue levels (MRLs) for S-metolachlor according to Article 12 of Regulation (EC) No 396/2005. **EFSA J** 10, 2586–2628. www.efsa.europa.eu/efsajournal.

ELAHI, Ehsan et al. The public policy of agricultural land allotment to agrarians and its impact on crop productivity in Punjab province of Pakistan. **Land Use Policy**, v. 90, p. 104324, 2020.

EMBRAPA. <https://www.embrapa.br/>, 2021. **Agrotóxicos no Brasil**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/dinamica/agrotoxicos-no-brasil#:~:text=Anualmente%20s%C3%A3o%20usados%20no%20mundo,mil%20toneladas%20de%20produtos%20comerciais.>>. Acesso em: 09, janeiro e 2022.

FALLAH, Zari et al. Toxicity and remediation of pharmaceuticals and pesticides using metal oxides and carbon nanomaterials. **Chemosphere**, v. 275, p. 130055, 2021.

FENG, Weimin et al. Hydrolysis of nicosulfuron under acidic environment caused by oxalate secretion of a novel *Penicillium oxalicum* strain YC-WM1. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-11, 2017.

FERNANDES, Thaís Cristina Casimiro; MAZZEO, Dânia Elisa Christofolletti; MARIN-MORALES, Maria Aparecida. Origin of nuclear and chromosomal alterations derived from the action of an aneugenic agent—Trifluralin herbicide. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 72, n. 6, p. 1680-1686, 2009.

FIGUEIREDO, Duarte D. et al. Auxin production in the endosperm drives seed coat development in Arabidopsis. **Elife**, v. 5, p. e20542, 2016.

FISKESJÖ, Geirid. The Allium test as a standard in environmental monitoring. **Hereditas**, v. 102, n. 1, p. 99-112, 1985.

FORT, Douglas J. et al. Effect of sulfometuron methyl and nicosulfuron on development and metamorphosis in *Xenopus laevis*: impact of purity. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 18, n. 12, p. 2934-2940, 1999.

FOURQUIN, Chloé et al. Mechanical stress mediated by both endosperm softening and embryo growth underlies endosperm elimination in Arabidopsis seeds. **Development**, v. 143, n. 18, p. 3300-3305, 2016.

GOLDBERG, Robert B.; DE PAIVA, Genaro; YADEGARI, Ramin. Plant embryogenesis: zygote to seed. **Science**, v. 266, n. 5185, p. 605-614, 1994.

GRANT, W.F. Chromosome aberration assays in Allium. *Mutation Research*, v.99, p.273-291, 1982.

GUELFÍ, Diego Roberto Vieira et al. Degradation of herbicide S-metolachlor by electrochemical AOPs using a boron-doped diamond anode. **Catalysis Today**, v. 313, p. 182-188, 2018.

GUIMARÃES R. C. M. Atributos químicos em solos tratados com lodo biológico de indústria de gelatina. 2009. 58 f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia)** - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal.

HARDELL, Lennart; ERIKSSON, Mikael; DEGERMAN, Anna. Exposure to phenoxyacetic acids, chlorophenols, or organic solvents in relation to histopathology, stage, and anatomical localization of non-Hodgkin's lymphoma. **Cancer Research**, v. 54, n. 9, p. 2386-2389, 1994.

HARTNETT, Sean; MUSAH, Sadiatu; DHANWADA, Kavita R. Cellular effects of metolachlor exposure on human liver (HepG2) cells. **Chemosphere**, v. 90, n. 3, p. 1258-1266, 2013.

JAIN, Rakesh; SINGH, Megh. Factors affecting goatweed (*Scoparia dulcis*) seed germination. **Weed science**, v. 37, n. 6, p. 766-770, 1989.

JIN, J.; MA, H.; CAO, X.F.; LI J.H.; ZHANG Q.Y.; CHEN, C.S. The discovery of the novel lead compound of N-nitroureas target on acetohydroxy acid synthase. **Pest Biochem Physiol** 104:218–223 (2012).

- JOLY, P. et al. Toxicity assessment of the maize herbicides S-metolachlor, benoxacor, mesotrione and nicosulfuron, and their corresponding commercial formulations, alone and in mixtures, using the Microtox® test. **Chemosphere**, v. 93, n. 10, p. 2444-2450, 2013.
- KARAM, Décio et al. Características do herbicida S-Metolachlor nas culturas de milho e sorgo. **Embrapa Milho e Sorgo-Circular Técnica (INFOTECA-E)**, 2003.
- KUMAR, Rahul et al. Impact of pesticide toxicity in aquatic environment. **Biointerface Research in Applied Chemistry**, v. 11, n. 3, p. 10131-10140, 2021.
- LEADEN, M; CASTANO, J.; BEDMAR, F. Evaluation of sulfonylurea herbicides on crop phytotoxicity forage and seed production in cocksfoot (*Dactylis glomerata*). **Ann Appl Biol** 128:48–49 (1996).
- LI, Huizhen et al. Sediment-associated pesticides in an urban stream in Guangzhou, China: Implication of a shift in pesticide use patterns. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 32, n. 5, p. 1040-1047, 2013.
- LI, Zijian. Spatiotemporal pattern models for bioaccumulation of pesticides in herbivores: an approximation theory for North American white-tailed deer. **Science of The Total Environment**, v. 737, p. 140271, 2020.
- LIMA, N. C. Avaliação do impacto da contaminação do solo de áreas agrícolas de Bom Repouso (MG) por meio de ensaios ecotoxicológicos. 2010. 130 f. **Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental)** - Universidade de São Paulo, São Carlos.
- LIMA, N. C.; NUNES, M. E. T.; ESPÍNDOLA, E. L. G. Avaliação de efeitos dos agrotóxicos clorpirifós e carbofuran e dos metais cádmio, cromo e cobre sobre minhocas *Eisenia fetida* (Annelida, Oligochaeta), em condições de laboratório., 2007. **Colombo: Embrapa Florestas**, 2007. p. 50.
- LIU, Kailin et al. Using in situ pore water concentrations to estimate the phytotoxicity of nicosulfuron in soils to corn (*Zea mays* L.). **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 31, n. 8, p. 1705-1711, 2012.
- LOPES, Carla Vanessa Alves; ALBUQUERQUE, Guilherme Souza Cavalcanti de. Agrotóxicos e seus impactos na saúde humana e ambiental: uma revisão sistemática. **Saúde em debate**, v. 42, p. 518-534, 2018.
- LUTTERBECK, Carlos Alexandre et al. Evaluation of the toxic effects of four anti-cancer drugs in plant bioassays and its potency for screening in the context of waste water reuse for irrigation. **Chemosphere**, v. 135, p. 403-410, 2015.
- MA, Ji-Ping et al. Biodegradation of the sulfonylurea herbicide chlorimuron-ethyl by the strain *Pseudomonas* sp. LW3. **FEMS microbiology letters**, v. 296, n. 2, p. 203-209, 2009.
- MACDONALD, Gregory E.; BRECKE, Barry J.; SHILLING, Donn G. Factors affecting germination of dogfennel (*Eupatorium capillifolium*) and yankeeweed (*Eupatorium compositifolium*). **Weed Science**, v. 40, n. 3, p. 424-428, 1992.

- MAI, Huong et al. Environmental concentrations of irgarol, diuron and S-metolachlor induce deleterious effects on gametes and embryos of the Pacific oyster, *Crassostrea gigas*. **Marine Environmental Research**, v. 89, p. 1-8, 2013.
- MANDAL, Asit et al. Impact of agrochemicals on soil health. In: **Agrochemicals detection, treatment and remediation**. Butterworth-Heinemann, 2020. p. 161-187.
- MARÍN-BENITO, Jesús M. et al. The role of two organic amendments to modify the environmental fate of S-metolachlor in agricultural soils. **Environmental Research**, v. 195, p. 110871, 2021.
- MARONIĆ, Dubravka Špoljarić et al. S-metolachlor promotes oxidative stress in green microalga *Parachlorella kessleri*-A potential environmental and health risk for higher organisms. **Science of the Total Environment**, v. 637, p. 41-49, 2018. MEENA, Ram Swaroop et al. Impact of agrochemicals on soil microbiota and management: A review. **Land**, v. 9, n. 2, p. 34, 2020.
- MENEZES, C. W. G. et al. Seletividade de atrazine e nicosulfuron a *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae). **Planta Daninha**, v. 30, p. 327-334, 2012.
- MIKÓ, Z. et al. Choice of experimental venue matters in ecotoxicology studies: comparison of a laboratory-based and an outdoor mesocosm experiment. **Aquatic Toxicology**, v. 167, p. 20-30, 2015.
- MILLER, G. Tyler; SPOOLMAN, Scott. **Sustaining the earth**. Cengage Learning, 2014.
- NEVES, M. F. J. V. et al. Biochemical and populational responses of an aquatic bioindicator species, *Daphnia longispina*, to a commercial formulation of a herbicide (Primextra® Gold TZ) and its active ingredient (S-metolachlor). **Ecological indicators**, v. 53, p. 220-230, 2015.
- NEVES, Pedro Dias Mangolini; MENDONÇA, Marcelo Rodrigues. Distribuição espacial dos casos de intoxicação por agrotóxicos agrícolas em diferentes monocultivos no estado de Goiás (2005-2015). 2018.
- OU-YANG, Kang et al. Bioaccumulation, metabolism and endocrine-reproductive effects of metolachlor and its S-enantiomer in adult zebrafish (*Danio rerio*). **Science of The Total Environment**, v. 802, p. 149826, 2022.
- PALMIERI, M. J. et al. Cytotoxic and phytotoxic effects of the main chemical components of spent pot-liner: A comparative approach. **Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis**, v. 763, p. 30–35, mar. 2014.
- PARK, Jihae et al. The sensitivity of an hydroponic lettuce root elongation bioassay to metals, phenol and wastewaters. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 126, p. 147-153, 2016.
- PAVLIDIS, George; TSIHRINTZIS, Vassilios A. Environmental benefits and control of pollution to surface water and groundwater by agroforestry systems: a review. **Water Resources Management**, v. 32, n. 1, p. 1-29, 2018.

- PASTOR, D. et al. Bioaccumulation of organochlorinated contaminants in three estuarine fish species (*Mullus barbatus*, *Mugil cephalus* and *Dicentrarchus labrax*). **Marine Pollution Bulletin**, v. 32, n. 3, p. 257-262, 1996.
- PINGALI, Prabhu L. Green revolution: impacts, limits, and the path ahead. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 31, p. 12302-12308, 2012.
- PINHO, Inês A. et al. Phytotoxicity assessment of olive mill solid wastes and the influence of phenolic compounds. **Chemosphere**, v. 185, p. 258-267, 2017.
- QUINTANEIRO, C. et al. Endocrine and physiological effects of linuron and S-metolachlor in zebrafish developing embryos. **Science of the Total Environment**, v. 586, p. 390-400, 2017.
- RANGANI, Gulab et al. Mechanism of resistance to S-metolachlor in Palmer amaranth. **Frontiers in plant science**, v. 12, p. 652581, 2021.
- REGITANO, J.B., KOSKINEN, W.C., 2008. Characterization of nicosulfuron availability in aged soils. **J. Agric. Food. Chem.** 56, 5801–5805.
- REPETTO, G. et al. A test battery for the ecotoxicological evaluation of pentachlorophenol. **Toxicology in Vitro**, v. 15, n. 4-5, p. 503-509, 2001.
- ROSENBOM, Annette Elisabeth; KJÆR, Jeanne; OLSEN, Preben. Long-term leaching of rimsulfuron degradation products through sandy agricultural soils. **Chemosphere**, v. 79, n. 8, p. 830-838, 2010.
- ROZMÁNKOVÁ, Eliška et al. Environmentally relevant mixture of S-metolachlor and its two metabolites affects thyroid metabolism in zebrafish embryos. **Aquatic Toxicology**, v. 221, p. 105444, 2020.
- SABADIE, Jean. Nicosulfuron: alcoholysis, chemical hydrolysis, and degradation on various minerals. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 50, n. 3, p. 526-531, 2002.
- SANDALIO, L. M. et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. **Journal of experimental botany**, v. 52, n. 364, p. 2115-2126, 2001.
- SCHIRMER G. K. Utilização do lodo de esgoto na vermicompostagem e como substrato para a produção de mudas de *Pinus elliottii* Engelm. 2010. 93 f. **Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)** - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- SHCHERBAN, E. P. et al. Impact of nicosulfuron-containing herbicide on *Ceriodaphnia affinis*. **Hydrobiological Journal**, v. 52, n. 5, p. 73-80, 2016.
- SIKKEMA, Peter H. et al. Broccoli, cabbage and cauliflower tolerance to sulfonylurea herbicides. **Crop Protection**, v. 25, n. 3, p. 225-229, 2006.

SINGH, Baljit; SHARMA, D. K.; GUPTA, Atul. A study towards release dynamics of thiram fungicide from starch–alginate beads to control environmental and health hazards. **Journal of hazardous materials**, v. 161, n. 1, p. 208-216, 2009.

SISINNO, CL SILVEIRA; OLIVEIRA-FILHO, EDUARDO C. Fundamentos da toxicologia ambiental. IN:_____. **Princípios de Toxicologia Ambiental. Rio de Janeiro: Interciência**, p. 19-6, 2013.

SISINNO, Cristina Lucia Silveira; OLIVEIRA-FILHO, Eduardo Cyrino. **Princípios de toxicologia ambiental**. Digitaliza Conteúdo, 2021.

TANETANI, Yoshitaka et al. Studies on the inhibition of plant very-long-chain fatty acid elongase by a novel herbicide, pyroxasulfone. **Journal of Pesticide Science**, p. 1101120181-1101120181, 2011.

TER HALLE, Alexandra; LAVIEILLE, Delphine; RICHARD, Claire. The effect of mixing two herbicides mesotrione and nicosulfuron on their photochemical reactivity on cuticular wax film. **Chemosphere**, v. 79, n. 4, p. 482-487, 2010.

THAKKAR, Bindiya et al. Metformin and sulfonylureas in relation to cancer risk in type II diabetes patients: a meta-analysis using primary data of published studies. **Metabolism**, v. 62, n. 7, p. 922-934, 2013.

THAYER, K. A.; HEINDEL, J. J.; BUCHER, J. R.; GALLO, M. A. Role of environmental chemicals in diabetes and obesity: a national toxicology program workshop review. **Environ. Health Perspect.** 2012, 120, 779–789.

THIOUR-MAUPRIVEZ, Clémence et al. Effects of herbicide on non-target microorganisms: towards a new class of biomarkers?. **Science of the Total Environment**, v. 684, p. 314-325, 2019.

TORRES RODRÍGUEZ, Marina Teresa. Empleo de los ensayos con plantas en el control de contaminantes tóxicos ambientales. **Revista Cubana de Higiene y Epidemiología**, v. 41, n. 2-3, p. 0-0, 2003.

TRENKAMP, S., MARTIN, W., TIETJEN, K., 2004. Specific and differential inhibition of verylong-chain fatty acid elongases from *Arabidopsis thaliana* by different herbicides. **Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.** 101 (32), 11903–11908

TRIGO, C., SPOKAS, K.A., COX, L., KOSKINEN, W.C., 2014. Influence of soil biochar aging on sorption of the herbicides MCPA, nicosulfuron, terbuthylazine, indaziflam, and fluoroethyldiaminotriazine. **J. Agric. Food. Chem.** 62, 10855–10860.

UKAOGO, Prince O.; EWUZIE, Ugochukwu; ONWUKA, Chibuzo V. Environmental pollution: causes, effects, and the remedies. In: **Microorganisms for sustainable environment and health**. Elsevier, 2020. p. 419-429.

VARCA, Leonila M. **Impact of agrochemicals on soil and water quality**. ASPAC Food & Fertilizer Technology Center, 2002.

VIANNA, Anderson Martins. Poluição ambiental, um problema de urbanização e crescimento desordenado das cidades. **Revista Sustinere**, v. 3, n. 1, p. 22-42, 2015.

WALTER, Magnus W. Structure-based design of agrochemicals. **Natural product reports**, v. 19, n. 3, p. 278-291, 2002.

WANG, J. *et al.* Reactive oxygen species, antioxidant enzyme activity, and gene expression patterns in a pair of nearly isogenic lines of nicosulfuron-exposed waxy maize (*Zea mays* L.). **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 19, p. 19012-19027, 2018.

WANG, Haizhen *et al.* Mineralization of metsulfuron-methyl in Chinese paddy soils. **Chemosphere**, v. 78, n. 3, p. 335-341, 2010.

WIMALAWANSA, Shehani A.; WIMALAWANSA, Sunil J. Agrochemical-related environmental pollution: effects on human health. **Global Journal of Biology, Agriculture and Health Sciences**, v. 3, n. 3, p. 72-83, 2014.

WOŁEJKO, Elżbieta *et al.* Dissipation of S-metolachlor in plant and soil and effect on enzymatic activities. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 7, p. 1-16, 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Public health impact of pesticides used in agriculture**. 1990.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO) (2014) 7 million deaths annually linked to air pollution. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/databases/en/.

WORTH, Andrew P. Types of toxicity and applications of toxicity testing. In: **The History of Alternative Test Methods in Toxicology**. Academic Press, 2019. p. 7-10.

YONG, You *et al.* The acute toxicity and risk assessment of four multi-combination nicosulfuron to *Apis mellifera* and *Trichogramma ostrinia*. **Asian Journal of Ecotoxicology**, n. 6, p. 298-306, 2018.

ZAHM, Shelia Hoar; WARD, Mary H. Pesticides and childhood cancer. **Environmental health perspectives**, v. 106, n. suppl 3, p. 893-908, 1998.

ZEMOLIN, C. R. *et al.* Environmental fate of S-metolachlor: a review. **Planta daninha**, v. 32, p. 655-664, 2014.

ZHANG, Anping *et al.* Residues of currently and never used organochlorine pesticides in agricultural soils from Zhejiang Province, China. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 60, n. 12, p. 2982-2988, 2012.

ZHANG, Hanyan *et al.* Bioremediation of co-contaminated soil with heavy metals and pesticides: Influence factors, mechanisms and evaluation methods. **Chemical Engineering Journal**, v. 398, p. 125657, 2020.

ZHANG, Xiao-Lin; LI, Yong-Mei; YUAN, Zhi-Wen. Degradation of nicosulfuron by combination effects of microorganisms and chemical hydrolysis. **Huan Jing ke Xue Huanjing Kexue**, v. 34, n. 7, p. 2889-2893, 2013.

ZHAO, Y. Y.; PEI, Y. S. Risk evaluation of groundwater pollution by pesticides in China: a short review. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, p. 1739-1747, 2012.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Norma NBR 6022 (ABNT 2018)

**ARTIGO - ECOTOXICIDADE DE HERBICIDAS À BASE DE NICOSULFURON E S-
METOLACHLOR:
UMA ABORDAGEM COMPARATIVA ENTRE MODELOS VEGETAIS**

RESUMO

Estudos têm sido realizados para avaliar os efeitos de herbicidas no ecossistema devido a preocupações crescentes sobre os impactos ambientais causados pela sua extensa aplicação na agricultura. O Nicosulfuron é um herbicida usado no controle pós-emergente de gramíneas anuais ou perenes e ervas daninhas de folhas largas. O S-Metolachlor é conhecido por ser utilizado como um herbicida de pré-emergência usado principalmente para controlar gramíneas anuais e algumas ervas daninhas de folhas largas em culturas intensivas. Neste sentido, o objetivo do trabalho é avaliar os efeitos de dois herbicidas, sendo um à base de Nicosulfuron e outro à base de S-Metolachlor no desenvolvimento inicial dos modelos vegetais *Lactuca sativa* L. (alface), *Raphanus sativus* (rabanete), *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br (milheto), e *Triticum aestivum* (trigo) através de bioensaios macroscópicos de germinação e desenvolvimento inicial da plântula.

Palavras-chave: Pesticida. Poluição. Germinação. Ecotoxicologia. Agroquímico

1 INTRODUÇÃO

Pesticidas são substâncias usadas no controle de pragas agrícolas podendo ser classificado de acordo com seu alvo biológico como, herbicidas (plantas), fungicidas (fungos) e inseticidas (insetos) (HANDLEY, 2019). Muitas moléculas usadas como princípios ativos dos pesticidas são altamente solúveis em água e persistentes, acumulando-se nos solos e em cursos d'água (FIORESSI *et al.*, 2019). Herbicidas à base de Nicosulfuron e S-Metolachlor são dois herbicidas muito utilizados, a nível mundial, em lavouras de milho e, a presença de resíduos desses dois princípios ativos em águas superficiais e subterrâneas já foi observada (GUELFY *et al.*, 2018; ZHANG, 2020).

O Nicosulfuron é um princípio ativo de herbicidas que pertence ao grupo químico das sulfoniluréias (LI *et al.*, 2020). É um pré-emergente que atua no controle de ervas daninhas de folhas largas e folhas estreitas presentes em monoculturas de milho. Em termos toxicológicos se enquadra na categoria 5 (produto improvável de causar dano agudo). No entanto, existe uma grande preocupação ambiental relacionado à presença de resíduos desse pesticida no ambiente, principalmente nos corpos d'água onde já foram detectados devido à sua característica de alta mobilidade no solo (ZHANG *et al.*, 2012). No ano de 2015, a venda de herbicidas de sulfoniluréias foi superior a 2 bilhões de euros, representando mais 11% do mercado global de herbicidas (XU, 2020). Em 2020 as vendas globais ultrapassaram 2,2 bilhões de euros, enquanto seu uso atingiu 11.000 toneladas em níveis globais (YANG; ZHANG, 2021).

Dentre os herbicidas de controle pré-emergente de plantas daninhas o S-metolachlor, herbicida pertencente à família das cloroacetamidas, vem ganhando destaque nos últimos anos. É caracterizado pela sua ação não sistêmica, utilizado exclusivamente na cultura de milho. Nos últimos anos, foram descobertos resíduos deste herbicida presentes em corpos d'água superficiais (ROZMÁNKOVÁ, *et al.*, 2020) e subterrâneos (DEMAILLY *et al.*, 2019, MARÍN-BENITO *et al.*, 2021) devido ao processo de escoamento agrícola que resulta na contaminação desses corpos d'água. É classificado como moderadamente tóxico (Classe III) e seus resíduos são classificados como persistentes devido à sua alta solubilidade em água (GUELFY *et al.*, 2018; MARIN BENITO *et al.*, 2021), baixa pressão de vapor e grande meia vida devido à lenta degradação por hidrólise ou fotólise (ROZMÁNKOVÁ *et al.*, 2020; MARÍN-BENITO *et al.*, 2021). No Brasil, o S-metolachlor é comercializado desde 1998 (Brasil, 2013) e, amplamente utilizado no âmbito global (ZEMOLIN *et al.*, 2014).

A poluição causada por esses pesticidas é agravante para o meio ambiente pois possuem potencial de acarretar danos a organismos não-alvo destes defensivos através da contaminação

causada por seus resíduos no ambiente, podendo, dessa forma, afetar negativamente as espécies expostas (CARSON, 2010; MIKÓ *et al.*, 2015). No entanto, a ecotoxicidade do Nicosulfuron e S-Metolachlor em organismos não alvo ainda é pouco conhecida.

Os estudos realizados até o momento sobre os efeitos tóxicos desses princípios ativos se baseiam principalmente em efeitos na fisiologia diminuindo o sucesso reprodutivo, interrompendo as funções endócrinas e imunotóxicas quando expostas a organismos não-alvos como em anfíbios, invertebrados, peixes, e plantas não alvos como arroz, milho, feijão, trigo e sorgo (QUADRO 1, 2, 3 e 4). Diante disso, é de extrema importância conhecer melhor a toxicidade desses pesticidas através da avaliação de risco de poluição em diferentes modelos para tomadas de decisões e desenvolvimento de medidas adequadas para preservação ambiental. Bioensaios com organismos modelos são os mais indicados e utilizados no monitoramento da ação tóxica dos poluentes sobre organismos vivos. Dentre os protocolos padronizados com organismos modelos disponíveis para acessar os riscos ambientais apresentados por poluentes emergentes como os herbicidas, as plantas se destacam (BOUTIN, 2011).

Os bioensaios que utilizam plantas superiores apresentam vantagens por serem mais simples e de baixo custo (FISKESJÖ, 1985; GRANT, 1982) e por não necessitar de aprovação em comissões éticas (ANDRADE-VIEIRA *et al.*, 2014) quando comparados aos bioensaios com modelos animais. Além disso, estudos mostraram que danos no DNA de células vegetais têm uma correlação com danos no DNA de leucócitos humanos (ANDRADE-VIEIRA *et al.*, 2017). Os modelos vegetais compõem ainda um sistema de grande importância como bioindicadoras de poluição e vêm sendo utilizadas há bastante tempo para este fim, uma vez que propiciam a avaliação da toxicidade e mutagenicidade no ambiente natural (*in situ*) (SANDALIO *et al.*, 2001). Em especial, os testes que envolvem a avaliação da germinação e desenvolvimento inicial de plântulas não alvo como modelos (WANG, 1991) são interessantes para prospecção de efeitos tóxicos além de serem ensaios padronizados de acordo com a OECD-208.

Diante do exposto, objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos de um herbicida à base de Nicosulfuron e um herbicida à base de S-metolachlor através de bioensaio de germinação e desenvolvimento inicial de plântulas dos modelos vegetais *Lactuca sativa* L. var. americana (alface), *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br (milheto), *Raphanus sativus* Crimson Gigante (Rabanete) e *Triticum aestivum* (Trigo) auxiliando no entendimento de possíveis riscos ecotoxicológicos desses herbicidas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 *Obtenção do material vegetal*

Quatro modelos vegetais, sendo duas dicotiledôneas, *Lactuca sativa* L. (alface) var. americana e *Raphanus sativus* Crimson Gigante (rabanete) e duas monocotiledôneas, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br (milheto), e *Triticum aestivum* (trigo) foram empregados como espécies não alvo no estudo. As espécies foram escolhidas de acordo com a Lista do anexo da OECD-208 (2006) que estabelece as diretrizes para realização de ensaio sobre a germinação e desenvolvimento inicial de plantas modelos.

As sementes das dicotiledôneas (*L. sativa* e *R. sativus*) foram adquiridas em casas agrocomerciais locais, com data de validade superior a um ano. As sementes das monocotiledôneas (*P. glaucum* e *T. aestivum*) foram adquiridas em comércio on-line com data de colheita do ano anterior à realização dos estudos. Todas as sementes foram armazenadas a 4°C até a utilização no estudo.

2.2 *Herbicidas Comerciais*

Os produtos comerciais Nortox 40SC, contendo 40,00 g/L de Nicosulfuron, e o DUAL GOLD, contendo 960 g/L de S-metolachlor, foram cedidos pelo setor de Melhoramento de Plantas do Departamento de Agronomia da Escola de Ciências Agrárias de Lavras (ESAL) da Universidade Federal de Lavras.

As soluções para os testes foram preparadas a partir desses produtos comerciais fazendo uma relação entre a área da placa de petri com a dose, por hectare, determinada para aplicação em campo, segundo a bula do fabricante de cada um dos herbicidas. Foram preparadas 10 concentrações de cada herbicida com um fator denominador de 1.8 entre elas, de acordo com a OECD 208.

Para controle positivo foi utilizado 0,25 g/L de glifosato (10%) (ALVES *et al.*, 2021) e para o controle negativo foi utilizado água destilada.

2.3 *Exposição das sementes e delineamento experimental*

Para o delineamento experimental, as sementes foram dispostas em placas de Petri de polietileno de 9 cm de diâmetro, contendo papel filtro embebido com cada uma das soluções testadas de cada herbicida. As placas foram armazenadas em BOD (Demanda Bioquímica de Oxigênio) à temperatura de 24 °C, sem fotoperíodo (NARWAL; SAMPIETRO; CATALÁN,

2009). O delineamento experimental foi realizado inteiramente ao acaso com cinco repetições para cada solução-teste. A repetição correspondeu a uma placa de Petri contendo 25 sementes do modelo vegetal em questão, tratada com uma determinada solução. Ao todo, foram 480 placas avaliadas dentre os quatro modelos e dois herbicidas, sendo 10 concentração, dois controles (positivo e negativo) e 5 repetições.

2.4 Determinação da Curva Dose-Efeito dos herbicidas

Soluções dos herbicidas comerciais contendo as seguintes concentrações finais, 0,154 g/L; 0,278 g/L; 0,5 g/L (dose de uso indicada na bula dos pesticidas); 0,9 g/L; 1,62 g/L; 2,916 g/L; 5,248 g/L; 9,448 g/L; 17.006 g/L e 30,611 g/L., do princípio ativo (Nicosulfuron ou S-metolachlor) diluídas em 25 ml de água destilada foram usadas para determinar a curva dose-efeito dos herbicidas. A germinação das quatro espécies modelo (alface, milho, rabanete e trigo) foram avaliadas observando e anotando o número de sementes germinadas (protrusão da radícula), a cada 12h, até completar um total de 72 h. Após as 72h, foi obtido o peso fresco das plântulas de cada placa de petri utilizando uma balança analítica (SHIMADZU, Modelo: AX200). As placas foram armazenadas em freezer a -10°C, estabilizando e paralisando o crescimento da plântula. Posteriormente, para aferição do tamanho das plântulas, as placas foram deixadas em temperatura ambiente, as plântulas foram posicionadas, delicadamente, sobre uma superfície escura, esticadas, e o comprimento das raízes e da parte aérea da plântula foi medido com auxílio de um paquímetro digital (MESSER 150mm/6" 0.01mm). A partir dessas análises foi calculado a porcentagem de germinação, o índice de velocidade de germinação (IVG), o comprimento da raiz e da parte aérea e massa fresca de acordo com Park et al., 2016.

2.5 Índice de toxicidade

A partir das respostas obtidas nas curvas de dose-efeito de cada um dos modelos para cada um dos herbicidas, foi calculado o índice de toxicidade. Para tanto, foi obtido a inibição de dado parâmetro (porcentagem de germinação, o índice de velocidade de germinação (IVG), o comprimento da raiz e da parte aérea e massa fresca) em relação ao controle negativo (água) para cada modelo em cada herbicida. Após, foi calculado a média de inibição dentre todas as concentrações aplicadas de um dado herbicida para um dado modelo e o valor obtido foi plotado em gráficos para comparação.

2.6 Teste Estatístico

Para verificar a diferença entre os tratamentos, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância ($\alpha = 0,05$) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. As análises estatísticas foram realizadas no programa R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2014).

2.7 Determinação da ecotoxicidade

A partir do teste de média e comparações par a par realizada entre as diferentes concentrações testadas dentro de um determinado modelo para ambos os herbicidas foi obtido os parâmetros ecotoxicológicos de importância para caracterização dos efeitos tóxicos dos herbicidas testados: NOEC (Maior concentração aplicada onde não foi observado efeito tóxico), LOEC (Menor concentração aplicada onde foi observado efeito tóxico) e EC₅₀ (Concentração testada que inibiu em torno de 50% o parâmetro avaliado em relação ao controle negativo).

3 RESULTADOS

3.1 Relação dose-efeito dos herbicidas nos modelos vegetais

O herbicida Nicosulfuron inibiu a germinação das sementes de *L. sativa* apenas nas maiores concentrações testadas (9,448g/L e 30,611g/L). O efeito de redução da germinação do modelo *L. sativa* para o herbicida S-metolachlor também só foi observado nas maiores concentrações. Para ambos herbicidas a inibição máxima foi em média 20% (Figura 1 e 2).

O desenvolvimento inicial das plântulas de *L. sativa* foi inibido pela ação dos herbicidas testados. A parte aérea apresentou uma redução significativa a partir da dose 1,62g/L de Nicosulfuron testada, enquanto que para a raiz, houve efeito inibitório a partir da dose 0,154 g/L (Figura 5). S-metolachlor apresentou efeito significativo em ambos parâmetros avaliados no desenvolvimento inicial (raiz e parte aérea) a partir da dose 0,278g/L (Figura 6). Conseqüentemente, o efeito de inibição no desenvolvimento inicial das plântulas influenciou a massa fresca. Foi observada redução significativa na dose 0,154g/L para Nicosulfuron e S-Metolachlor em relação à massa fresca (Figura 6 e 7). Por outro lado, a redução do IVG nas sementes de alface em relação a maior concentração testada foi de 72,64% e 69,65% para o herbicida Nicosulfuron e S-Metolachlor, respectivamente (Figura 3,4 e 10).

Para o modelo vegetal *P. glaucum*, não foi observado uma inibição significativa em sementes expostas ao Nicosulfuron, em contrapartida, houve inibição nas maiores concentrações testadas de S-Metolachlor (9,448g/L e 17,066g/L) apresentando em média uma

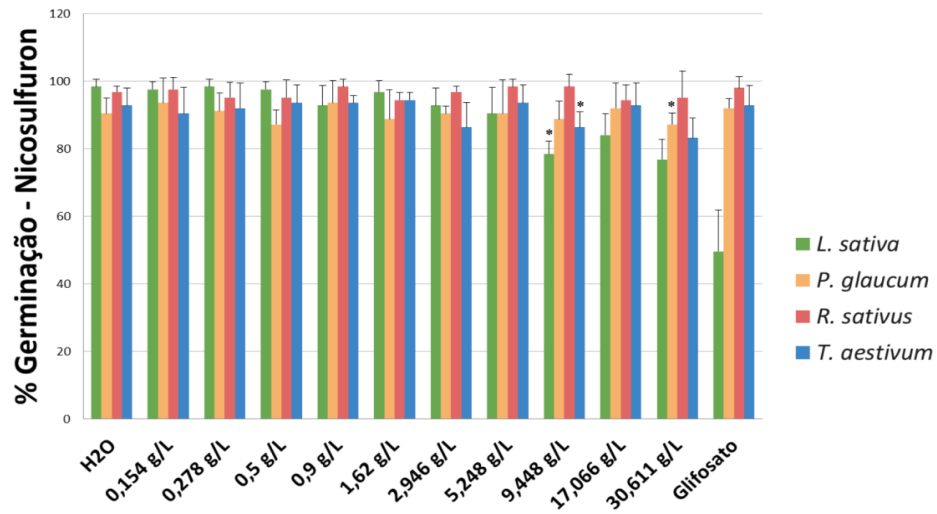
inibição de 25% (Figura 1, 2 e 10). Em relação ao IVG, a redução na velocidade de germinação nas sementes de *P. glaucum* em relação à maior concentração testada foi de 48,35% para o herbicida Nicosulfuron e 57,61% para o S-Metolachlor (Figura 3,4 e 10).

O desenvolvimento inicial das plântulas de *P. glaucum* foi inibido pela ação dos herbicidas testados. Para ambos herbicidas o desenvolvimento inicial (parte aérea e raiz) foram inibidos a partir da dose 0,154 g/L (Figura 5), havendo, dessa forma, influência na massa fresca que apresentou redução significativa do peso a partir desta mesma dose (Figura 6 e 7).

Quanto ao *R. sativus*, não houve uma inibição significativa na germinação de sementes expostas nos herbicidas testados (Figura 1,2 e 10). Avaliando o parâmetro relacionado a velocidade de germinação, para o Nicosulfuron houve redução do IVG a partir da dose 9,448g/L e na dose 17,006g/L para o S-Metolachlor (Figura 3 e 4). Em relação ao desenvolvimento da parte aérea, apresentaram redução no seu crescimento a partir de 2,946g/L para a parte aérea e 0,154g/L para raiz em ambos herbicidas testados (Figura 5). Para a massa fresca, houve redução no peso a partir do 2,946g/L para Nicosulfuron e 17,006g/L para S-Metolachlor (Figura 6 e 7).

Para o modelo *T. aestivum*, o Nicosulfuron não inibiu consideravelmente a germinação das sementes, porém, no S-Metolachlor apresentou efeito na redução da germinação a partir da concentração testada (5,248g/L) (Figura 1 e 2). A inibição máxima apresentada no herbicida S-Metolachlor foi de 46,5%. Em relação ao IVG, a redução na velocidade de germinação nas sementes de *T. aestivum* em relação à maior concentração testada foi de aproximadamente 49% e 77% para o Nicosulfuron e S-Metolachlor, respectivamente (Figura 3, 4 e 10). Para ambos herbicidas, o desenvolvimento inicial (parte aérea e raiz) foram inibidos a partir da dose 0,154 g/L (Figura 5). Houve uma redução significativa a partir da mesma dose para o peso fresco das plântulas (Figura 6 e 7).

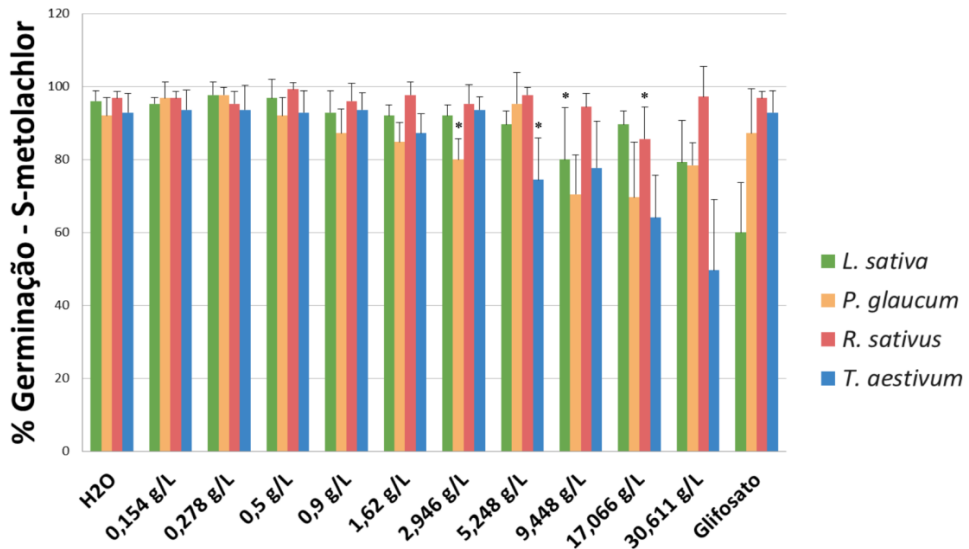
Figura 1 - Porcentagem de Germinação em sementes expostas ao herbicida Nicosulfuron.



Legenda: Porcentagem de germinação de sementes expostas ao herbicida à base de Nicosulfuron. Asteriscos (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito na velocidade de germinação.

Fonte: Do autor (2023)

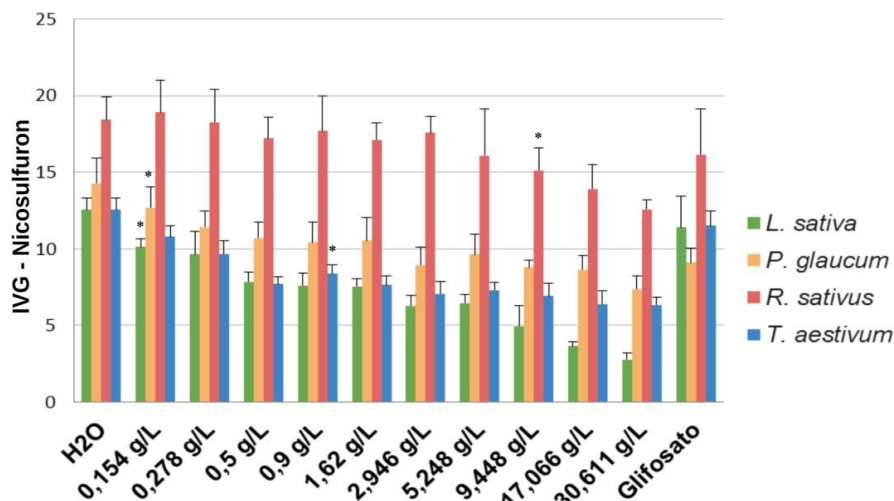
Figura 2 - Porcentagem de Germinação em sementes expostas ao herbicida S-Metolachlor.



Legenda: Porcentagem de germinação de sementes expostas ao herbicida à base de S-metolachlor. Asteriscos (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito na velocidade de germinação.

Fonte: Do autor (2023)

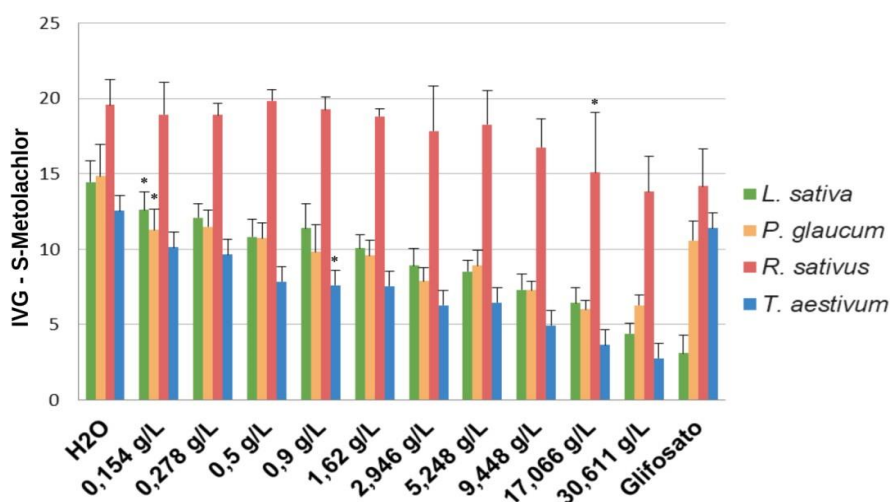
Figura 3 – Índice de Velocidade de Germinação de sementes expostas ao herbicida Nicosulfuron.



Legenda: Índice de Velocidade de Germinação de sementes expostas ao herbicida à base de Nicosulfuron. Asteriscos (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito na velocidade de germinação.

Fonte: Do autor (2023)

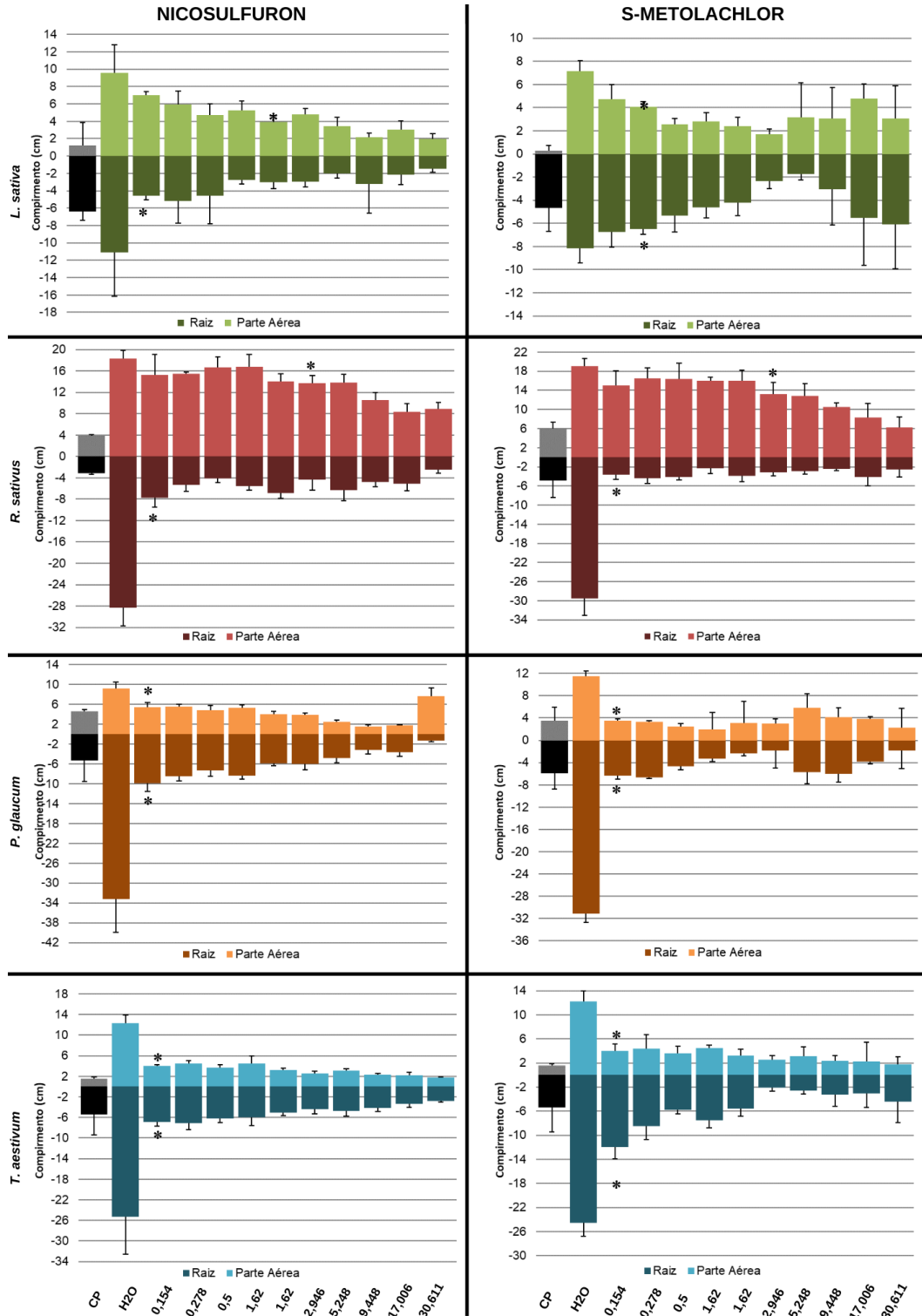
Figura 4 - Índice de Velocidade de Germinação de sementes expostas ao herbicida S-Metolachlor.



Legenda: Índice de Velocidade de Germinação de sementes expostas ao herbicida à base de S-metolachlor. Asteriscos (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito na velocidade de germinação.

Fonte: Do autor (2023)

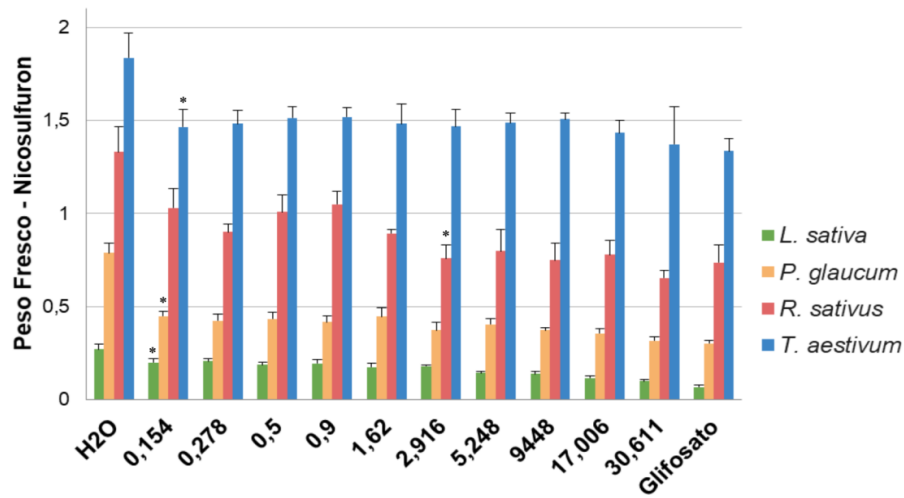
Figura 5 - Crescimento inicial das plântulas dos quatro modelos expostos aos herbicidas à base de Nicosulfuron e S-Metolachlor.



Legenda: Asterisco (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito tamanho das plântulas.

Fonte: Do autor (2023)

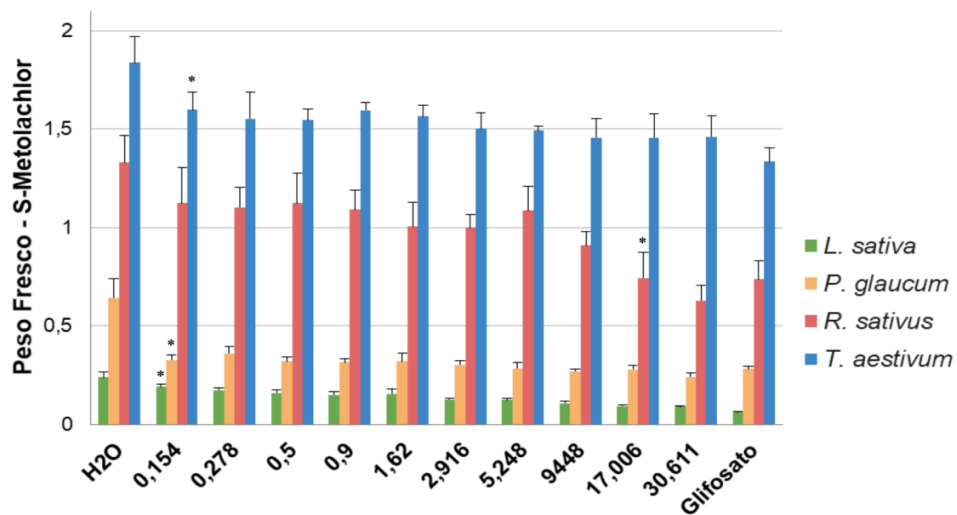
Figura 6 - Peso fresco dos quatro modelos expostos aos herbicidas à base de Nicosulfuron.



Legenda: Asteriscos (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito na velocidade de germinação.

Fonte: Do autor (2023)

Figura 7 - Peso fresco das plântulas dos quatro modelos expostos aos herbicidas à base de S-Metolachlor.



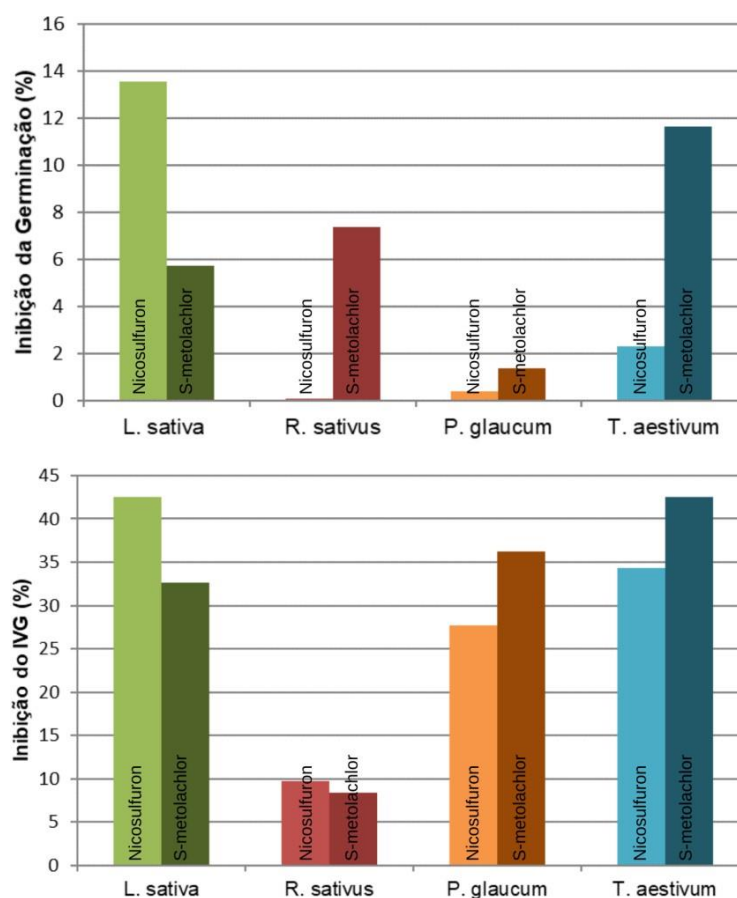
Legenda: Asteriscos (*) representam a partir de qual dose apresentou efeito na velocidade de germinação.

Fonte: Do autor (2023)

3.2 Sensibilidade dos modelos vegetais aos herbicidas

O índice de toxicidade calculado permitiu a observação da sensibilidade dos modelos em relação aos herbicidas considerando os parâmetros avaliados. Dentre as quatro espécies utilizadas, o modelo vegetal *L. sativa* apresentou maior sensibilidade em relação à porcentagem de germinação para o Nicosulfuron seguido do *T. aestivum*, *R. sativus* e *P. glaucum*. O mesmo resultado é visto para o índice de velocidade de germinação. Para o S-metolachlor, a maior sensibilidade foi observada no *T. aestivum*, seguido do *R. sativus*, *L. sativa* e o menos sensível, o *P. glaucum*. Quanto ao índice de velocidade de germinação, a maior sensibilidade foi observada na *L. sativa* apresentando, portanto, maior efeito inibitório na velocidade de germinação, seguida dos modelos *T. aestivum*, *P. glaucum*, e por fim, o *R. sativus* apresentando a menor sensibilidade entre os modelos avaliados (Figura 8).

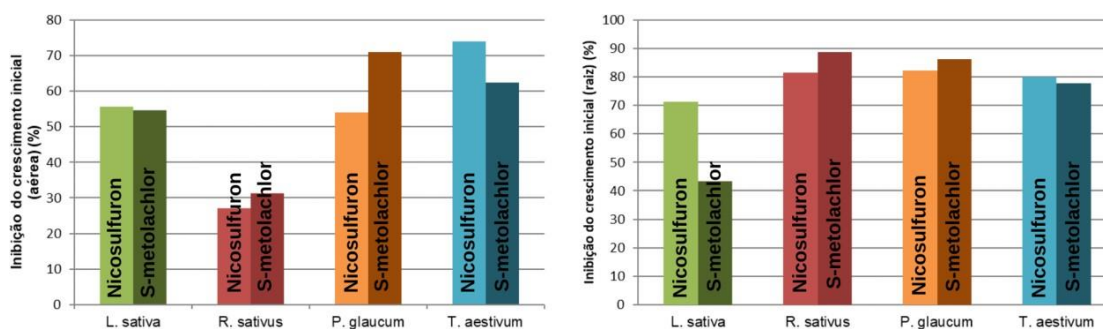
Figura 8 - Porcentagem de inibição dos parâmetros Porcentagem de Germinação e Índice de Velocidade de Germinação (IVG) dos quatro modelos vegetais expostos a ambos herbicidas.



Fonte: Do autor (2023)

Quanto ao desenvolvimento inicial das plântulas, o modelo *P. glaucum* apresenta a maior sensibilidade no desenvolvimento radicular quando exposto ao Nicosulfuron, seguido pelo *P. glaucum*, *R. sativus* e *L. sativa*. Quando expostas ao S-metolachlor, o modelo *R. sativus* apresenta a maior sensibilidade, seguindo pelo *P. glaucum*, *T. aestivum* e por fim, pelo modelo menos sensível nesse parâmetro, a *L. sativa*. Em relação à parte aérea, é observado maior sensibilidade para o Nicosulfuron no modelo *T. aestivum*, seguido do *L. sativa*, *P. glaucum* e *R. sativus*. Para o S-metolachlor, temos o *P. glaucum* apresentando a maior sensibilidade, seguido do *T. aestivum*, *L. sativa* e *R. sativus* (Figura 9).

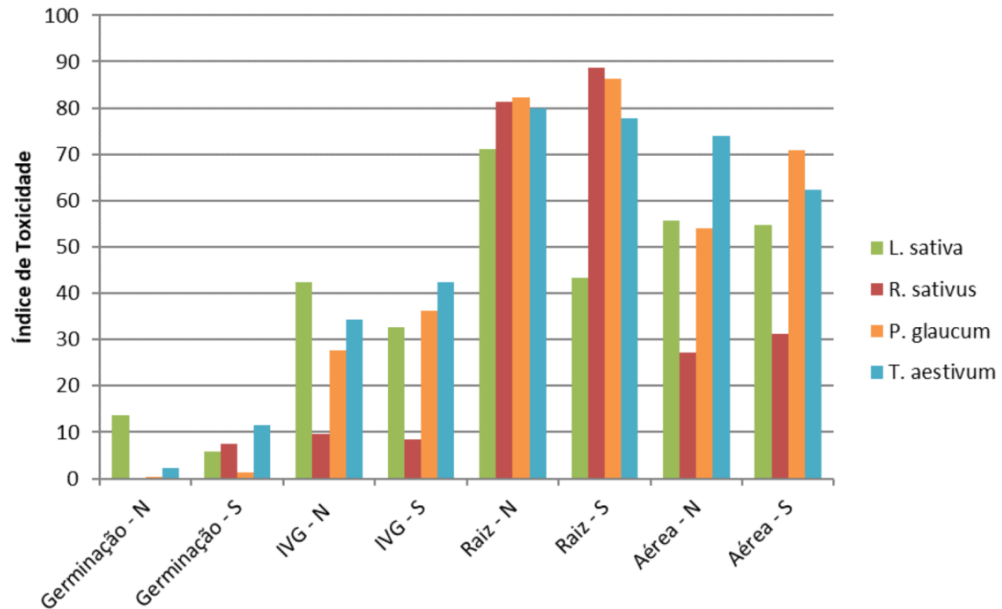
Figura 9 - Porcentagem da inibição do crescimento inicial (aérea e raiz) das plântulas dos quatro modelos vegetais expostos a ambos herbicidas.



Fonte: Do autor (2023)

Em termos gerais, quando é estabelecido uma média entre todos os parâmetros avaliados, o *T. aestivum* é o modelo mais sensível quando exposto ao Nicosulfuron. O *L. sativa* apresenta a segunda maior sensibilidade, seguido do *P. glaucum* e, apresentando a menor sensibilidade quando exposto ao herbicida em questão, o *R. sativus*. Quando avaliado a média entre os parâmetros de cada modelos expostos ao princípio ativo do s-metolachlor, as espécies monocotiledôneas (*T. aestivum* e *P. glaucum*) apresentaram maior sensibilidade quando comparadas com as espécies dicotiledôneas (*L. sativa* e *R. sativus*) (Figura 10 e 11).

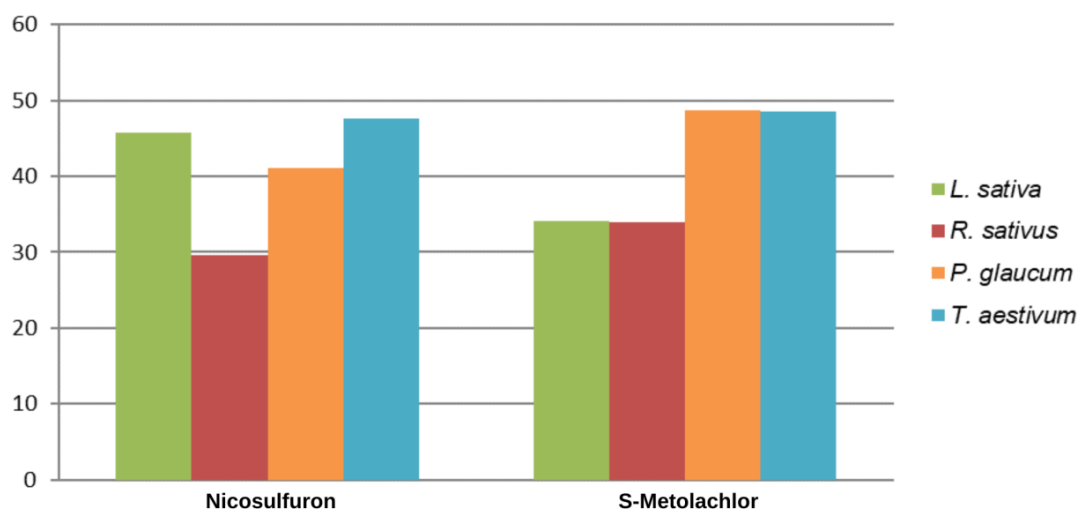
Figura 10 - Média de cada parâmetro avaliado dos quatros modelos vegetais e ambos herbicidas indicando o índice de toxicidade.



Legenda: N - Nicosulfuron, S - S-Metolachlor, IVG - Índice de Velocidade de Germinação.

Fonte: Do autor (2023)

Figura 11 - Média de todos os parâmetros avaliados dos quatros modelos vegetais e ambos herbicidas indicando o índice de toxicidade.



Fonte: Do autor (2023)

3.3 Ecotoxicidade dos herbicidas nos modelos vegetais

O NOEC (0,5 g/L) e LOEC (1,62 g/L) observado para a germinação foi igual para ambos herbicidas testados independente do modelo vegetal utilizado. Por outro lado, para IVG houve diferença entre os parâmetros ecotoxicológicos (NOEC e LOEC) para os herbicidas testados em todos os modelos vegetais (Figura 3 e 4) apresentando NOEC. No desenvolvimento da parte aérea, observou-se como LOEC a dose de 1,62g/L e NOEC 0,9g/L em *L. sativa* exposta ao Nicosulfuron e (0,278g/L como LOEC e (0,154g/L) NOEC quando exposto ao S- metolachlor. Em *P. glaucum*, e *T. aestivum*, obteve-se (0,154g/L) como o LOEC e em *R. sativus*, (2,946g/L) como LOEC e (0,154g/L) o NOEC para ambos herbicidas testados.

Foi observado que para todos os modelos e em ambos herbicidas, o parâmetro raiz e massa fresca apresentaram o mesmo LOEC (0,154g/L) e não obteve NOEC.

A dose testada que representou o EC50 foi na variável Índice de Velocidade de Germinação do herbicida à base de Nicosulfuron (2,946g/L) da espécie *L. sativa* e (30,611g/L) na espécie *P. glaucum* e *T. aestivum*. Para o S-metolachlor, apresentaram o EC50 na dose da mesma variável na espécie *L. sativa* (17,066g/L), na espécie *P. glaucum* (9,448g/L) e na espécie *T. aestivum* (2,946g/L).

4 DISCUSSÃO

Até o momento, os trabalhos sobre a toxicidade dos herbicidas à base de Nicosulfuron e S-Metolachlor em vegetais têm sido realizados majoritariamente com o milho (*Zea mays* L.) (DOBBELS & KAPUSTA, 1993; LIU *et al.*, 2012; WANG *et al.*, 2022). Neste sentido, em nosso conhecimento, o presente trabalho é pioneiro na utilização de outros modelos vegetais previstos pela *Organization for Economic Co-operation and Development* (OECD) e pela normativa ISO 18763:2016 trazendo uma abordagem comparativa dos efeitos de toxicidade que cada um desses herbicidas apresenta.

Diante dos resultados obtidos, foi observado que o modelo vegetal mais sensível entre os modelos avaliados, foi a *T. aestivum* quando exposta em ambos os herbicidas, porém, todos os modelos apresentaram um efeito fitotóxico. Adicionalmente, o efeito observado dos herbicidas nos modelos testados foi dose-dependente: à medida que as concentrações dos respectivos princípios ativos dos herbicidas testados aumentaram, houve uma diminuição significativa na velocidade de germinação das sementes, assim como, no desenvolvimento das plântulas, e, conseqüentemente, uma redução no peso fresco. A germinação das sementes

depende de fatores fisiológicos, dentre eles, a absorção de água e nutrientes. O processo de absorção de água pela semente (embebição) ativa processos metabólicos que subsequentemente levam à expansão do embrião e penetração da radícula (ou outro órgão) através dos tecidos circundantes (BEWLEY *et al.*, 2013), sendo um fator independente do desenvolvimento da plântula que, depende de condições ideais para o aumento do número de células, através da divisão celular, e o alongamento celular (SPAETH, 1994). Neste sentido, a germinação é o parâmetro menos sensível dentre os parâmetros avaliados, pois, apesar da complexidade do fenômeno, considera-se germinada a semente que nesse processo rompeu o tegumento. Logo, apesar das sementes dos modelos testados terem germinado em todos os tratamentos de ambos herbicidas, houve inibição significativa do crescimento da raiz e parte aérea devido aos mecanismos de ação de ambos herbicidas que muitas vezes não permitem a proliferação das células, prejudicando o crescimento das plântulas expostas.

O mecanismo de ação dos herbicidas à base de Nicosulfuron e S-Metolachlor são distintos. Por um lado o Nicosulfuron, um herbicida pós emergente, atua na inibição da enzima ALS (enzima acetato sintase), que é responsável pela interrupção da divisão celular e, como consequência, a interrupção do crescimento da plântula (DUUS; KRUSE; STREIBIG, 2018) enquanto que o herbicida à base de S-Metolachlor, atua como um pré-emergente em culturas. Seu modo de ação consiste em inibir processos biológicos relacionados ao crescimento da planta em suas zonas meristemáticas. É responsável pela inibição do gene FAE1, que altera a integridade e função de elongases, responsáveis pelo alongamento de ácidos graxos altamente insaturados (HUFA) e ácidos graxos de cadeia longa (mais de 18 átomos de carbono) que são de extrema importância na constituição da membrana plasmática da célula e compartimentos da parede celular (NEVES *et al.*, 2015; COPIN; PERRONET; CHÈVRE, 2016; MARONIC *et al.*, 2018; DEMAILLY *et al.*, 2019). Ou seja, o crescimento das plantas a partir dos meristemas, após a germinação e na emergência de folhas é inibido por tais herbicidas (SIKKEMA: SHROPSHIRE: SOLTANI, 2019) que são, portanto, inibidores do crescimento apical e da raiz (KARAM *et al.*, 2003), como observado nos resultados deste estudo utilizando espécies não-alvo dos herbicidas testados.

Semelhante ao que foi apresentado neste trabalho, o herbicida S-Metolachlor apresentou efeitos sobre o crescimento radicular de milho e arroz em condições de hidroponia, mostrando-se tóxico para essas plantas, onde apresentou inibição nos crescimentos radiculares, bem como, no desenvolvimento da planta (LIU *et al.*, 2012). Pesquisas em campo foram conduzidas utilizando feijão (*Phaseolus vulgaris*) que foram expostos ao S-Metolachlor. Foi observado

lesões mínimas em condição de aplicação em campo como a redução do crescimento das folhas, além de apresentarem necrose e clorose (SIKKEMA; SHROPSHIRE; SOLTANI, 2009).

Existem outros trabalhos de campo e/ou casa de vegetação que relatam a fitotoxicidade em feijão (SANTOS *et al.*, 2012; KALSING; VIDAL, 2013) e batata doce (ABUKARI; SHANKLE; REDDY, 2015) causada pela exposição ao S-Metolachlor causando efeitos adversos no desenvolvimento da planta desde a redução da matéria seca, altura da planta, lesões, redução no número de folhas e na área foliar e, principalmente, na redução do comprimento radicular e caulinar, um dos parâmetros avaliados neste estudo.

Estudos com ensaios em campo utilizando plantas daninhas da cultura do tomate também foram conduzidos no intuito de avaliar os efeitos do herbicida S-Metolachlor nas plantas. Foi observado que este herbicida possui maior eficácia contra ervas daninhas de folhas largas (dicotiledôneas) como *Amaranthus dubius*, *Echinochloa colona*, *Cleome viscosa*, *Portulaca oleraceae*, *Digitaria* spp., *Echinochloa indica* e *Trianthema* spp., afetando diretamente a densidade dessas espécies daninhas do que para ervas daninhas de folha fina, por exemplo, Cyperaceae (monocotiledônea) (SANTOS *et al.*, 2008) diferente dos resultados obtidos neste trabalho onde o S-Metolachlor apresentou maior índice de toxicidade em espécies monocotiledôneas que em espécies dicotiledôneas (Figura 11).

Adicionalmente, em um trabalho de campo utilizando milho de pipoca (pertencente à mesma família botânica do milho) obteve níveis de toxicidade quando expostas ao Nicosulfuron. Foi observado toxicidade nas plantas após a aplicação sendo mais evidente tais níveis de toxicidade à medida que se elevaram as doses (Figura 5). Tais resultados condizem com os resultados obtidos em relação aos níveis de toxicidade à medida que as doses de ambos herbicidas são elevadas. Nesse mesmo trabalho, foi relatado que o herbicida foi altamente tóxico para *Brachiaria plantaginea* e *Brachiaria decumbens* (monocotiledôneas) e não tão eficiente para a espécie *Ipomoea* (dicotiledônea) (JAKELAITIS *et al.*, 2005) É importante ressaltar que herbicidas à base de sulfoniluréias são altamente eficientes no controle de muitas gramíneas (monocotiledôneas) e algumas ervas daninhas de folhas largas (dicotiledônea). De modo geral, o Nicosulfuron controla melhor as monocotiledôneas que as dicotiledôneas.

Outros trabalhos também relatam o efeito de fitotoxicidade em monocotiledôneas em condição de campo quando expostos ao Nicosulfuron e tais resultados se assemelham com o encontrado neste trabalho em relação ao crescimento e desenvolvimento da espécie *T. aestivum*. Em Martins *et al.*, (2007) foi relatado que o Nicosulfuron reduziu o crescimento das espécies *Brachiaria Brizantha* (cv. Marandu) e em *Brachiaria decumbens* (cv. Basilisk). Em *Brachiaria*

ruzizensis, o Nicosulfuron provoca clorose foliar, apresentando necrose e redução no crescimento da planta (CECCON et al., 2010). E, causa alta intoxicação em *Brachiaria decumbens* (cv. Basilisk) e *Brachiaria ruzizensis* interferindo diretamente em seu crescimento (ANESIO et al., 2017). Esses trabalhos corroboram com os resultados obtidos onde as espécies monocotiledôneas, especialmente o *T. aestivum* apresentou maior nível de toxicidade entre os modelos avaliados (Figura 11)

O Nicosulfuron também se mostrou tóxico em um trabalho de campo para as espécies dicotiledôneas *Amaranthus retroflexus* L. e *Chenopodium album* L., afetando o crescimento das duas espécies, o que é visto para a espécie *L. sativa* neste trabalho onde seu desenvolvimento foi afetado e sendo a espécie *L. sativa* uma dicotiledônea (SARABI et al., 2018).

REFERÊNCIAS

- ALVES, THAMMYRES A. et al. Bioactivity and molecular properties of Phenoxyacetic Acids Derived from Eugenol and Guaiacol compared to the herbicide 2,4-D. **Anais da Academia Brasileira de Ciências [online]**. 2021, v. 93, n. 4
- AN, Youn-Joo. Soil ecotoxicity assessment using cadmium sensitive plants. **Environmental pollution**, v. 127, n. 1, p. 21-26, 2004.
- ANDRADE-VIEIRA, Larissa Fonseca; PALMIERI, Marcel José; DAVIDE, Lisete Chamma. Effects of long exposure to spent potliner on seeds, root tips, and meristematic cells of *Allium cepa* L. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 10, p. 1-7, 2017.
- ANÉSIO, Arnon Henrique Campos et al. Herbicide selectivity to signal grass and congo grass. **Planta Daninha**, v. 35, 2017.
- BANKS, J. E. et al. Time-varying vital rates in ecotoxicology: selective pesticides and aphid population dynamics. **Ecological Modelling**, v. 210, n. 1-2, p. 155-160, 2008.
- BEWLEY, J. Derek et al. Germination. In: **Seeds**. Springer, New York, NY, 2013. p. 133-181.
- BOUTIN, C. et al. Phytotoxicity testing for herbicide regulation: Shortcomings in relation to biodiversity and ecosystem services in agrarian systems. **Science of the Total Environment** 415, 2011. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.04.046.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agrofit – Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários**. Brasília: 2013.
- CARSON, R. **Primavera Silenciosa** (Traduzido por Cláudia Sant'Ana Martins), São Paulo: Gaia, 2010
- CECCON, G. et al. Use of herbicides in off-season corn intercropped with *Brachiaria ruziziensis*. **Planta Daninha**, v. 28, p. 359-364, 2010.
- CHERON, Marion; COSTANTINI, David; BRISCHOUX, François. Nicosulfuron, a sulfonylurea herbicide, alters embryonic development and oxidative status of hatchlings at environmental concentrations in an amphibian species. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 232, p. 113277, 2022.
- COPIN, Pierre-Jean; PERRONET, Léa; CHÈVRE, Nathalie. Modelling the effect of exposing algae to pulses of S-metolachlor: how to include a delay to the onset of the effect and in the recovery. **Science of the Total Environment**, v. 541, p. 257-267, 2016.
- DEMARTELAERE, A. C. F. et al. Danos causados ao meio ambiente, animais e ao homem com a utilização de agrotóxico: revisão bibliográfica. Damage caused environment, animals and man with the use pesticides: bibliographic review. 2021.

DEMAILLY, F. et al. Impact of diuron and S-metolachlor on the freshwater diatom *Gomphonema gracile*: Complementarity between fatty acid profiles and different kinds of ecotoxicological impact-endpoints. **Science of the Total Environment**, v. 688, p. 960-967, 2019.

DOBBELS, A.F., KAPUSTA, G., 1993. Postemergence weeds control in corn (*Zea mays*) with nicosulfuron combinations. **Weed Technol.** 7, 844–850. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1993.tb01958.x>.

DUGANDŽIĆ, A. M. *et al.* Effect os inorganic ions, photosensitisers and scavengers on the photocatalytic degradation of nicosulfuron. **Journal of photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 336, p. 146-155, 2017.

DUUS, J.; KRUSE, N. D.; STREIBIG, J. C. Effect of Mesotrione and Nicosulfuron Mixtures With or Without Adjuvants. **Planta Daninha**, v. 36, 2018.

FIORESSI, Silvina E. et al. Conformation-independent quantitative structure-property relationships study on water solubility of pesticides. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 171, p. 47-53, 2019.

FISKESJÖ, Geirid. The Allium test as a standard in environmental monitoring. **Hereditas**, v. 102, n. 1, p. 99-112, 1985.

FORT, Douglas J. et al. Effect of sulfometuron methyl and nicosulfuron on development and metamorphosis in *Xenopus laevis*: impact of purity. **Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal**, v. 18, n. 12, p. 2934-2940, 1999.

GRANT, W.F. Chromosome aberration assays in *Allium*. **Mutation Research**, v.99, p.273-291, 1982.

GUELFY, Diego Roberto Vieira et al. Degradation of herbicide S-metolachlor by electrochemical AOPs using a boron-doped diamond anode. **Catalysis Today**, v. 313, p. 182-188, 2018.

HANDLEY, John. Pesticides-A brief history and analysis. **Chemical & fertilizers and technical. Pitschcare Magazine**, v. 83, 2019.

JAKELAITIS, Adriano et al. Influência de herbicidas e de sistemas de semeadura de *Brachiaria brizantha* consorciada com milho. **Planta daninha**, v. 23, p. 59-67, 2005.

JOHN, Matt K.; VANLAERHOVEN, Cornelis J.; CHUAH, Hong H. Factors affecting plant uptake and phytotoxicity of cadmium added to soils. **Environmental science & technology**, v. 6, n. 12, p. 1005-1009, 1972.

LI, Zijian. Spatiotemporal pattern models for bioaccumulation of pesticides in herbivores: an approximation theory for North American white-tailed deer. **Science of The Total Environment**, v. 737, p. 140271, 2020.

LIU, K.L., CAO, Z.Y., PAN, X., YU, Y.L., 2012. Using in situ pore water concentrations to estimate the phytotoxicity of nicosulfuron in soils to corn (*Zea mays* L.). **Environ. Toxicol. Chem.** 31, 1705–1711.

MARÍN-BENITO, Jesús M. et al. The role of two organic amendments to modify the environmental fate of S-metolachlor in agricultural soils. **Environmental Research**, v. 195, p. 110871, 2021.

MARONIĆ, D.Š., ČAMAGAJEVAC, I.Š., HORVATIĆ, J., PFEIFFER, T.Ž., STEVIĆ, F., ŽARKOVIĆ, N., WAEG, G., JAGANJAC, M., 2018. S-metolachlor promotes oxidative stress in green microalga *Parachlorella kessleri*-a potential environmental and health risk for higher organisms. **Sci. Total Environ.** 637, 41–49.

MARTINS, Dagoberto et al. Seletividade de herbicidas aplicados em pós-emergência sobre capim-braquiária. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 36, p. 1969-1974, 2007.

MENEZES, C. W. G. et al. Seletividade de atrazine e nicosulfuron a *Podisus nigrispinus* (Heteroptera: Pentatomidae). **Planta Daninha**, v. 30, p. 327-334, 2012.

MIKÓ, Z. et al. Choice of experimental venue matters in ecotoxicology studies: comparison of a laboratory-based and an outdoor mesocosm experiment. **Aquatic Toxicology**, v. 167, p. 20-30, 2015.

NARWAL, S. S.; SAMPIETRO, D. A.; CATALÁN, C. A. N. Chapter 1: laboratory bioassays in allelopathy. **Plant Bioassays, Studium Press, Houston, Texas**, p. 1-20, 2009.

NEVES, M. F. J. V. et al. Biochemical and populational responses of an aquatic bioindicator species, *Daphnia longispina*, to a commercial formulation of a herbicide (Primextra® Gold TZ) and its active ingredient (S-metolachlor). **Ecological indicators**, v. 53, p. 220-230, 2015.

OECD. **OECD Guidelines For the Testing Of Chemicals**. Adopted: 19, July, 2006.

ROZMÁNKOVÁ, Eliška et al. Environmentally relevant mixture of S-metolachlor and its two metabolites affects thyroid metabolism in zebrafish embryos. **Aquatic Toxicology**, v. 221, p. 105444, 2020.

SANDALIO, L. M. et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. **Journal of experimental botany**, v. 52, n. 364, p. 2115-2126, 2001.

SANTOS, Bielinski M. et al. Managing weeds with drip-applied herbicides in tomato. **Crop Protection**, v. 27, n. 1, p. 101-103, 2008.

SARABI, Vahid et al. Broadleaf Weed Control in Corn (*Zea mays* L.) with Sulfonylurea Herbicides Tank-mixed with 2, 4-D+ MCPA. **Agronomy Journal**, v. 110, n. 2, p. 638-645, 2018.

SHCHERBAN, E. P. et al. Impact of nicosulfuron-containing herbicide on *Ceriodaphnia* affinis. **Hydrobiological Journal**, v. 52, n. 5, p. 73-80, 2016.

SIKKEMA, Peter H. et al. Broccoli, cabbage and cauliflower tolerance to sulfonylurea herbicides. **Crop Protection**, v. 25, n. 3, p. 225-229, 2006.

SPAETH, Stephen C. Germination and Seedling Establishment: Discussion. **Physiology and Determination of Crop Yield**, p. 61-63, 1994.

TANG, Fiona HM et al. Risk of pesticide pollution at the global scale. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 4, p. 206-210, 2021.

WANG, Wuncheng. Literature review on higher plants for toxicity testing. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 59, p. 381-400, 1991.

WANG, Longfeng et al. Study on phytotoxicity evaluation and physiological properties of nicosulfuron on sugar beet (*Beta vulgaris* L.). **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p. 998867, 2022.

XU, L. Review on the Development of Sulfonamide Herbicides. **Market Aspec.** 2020, 5, 3.
YANG, Y. J.; ZHANG, B. Market and Industrial Chain Analysis of Rimsulfuron (2020). **Pestic. Sci. Admin.** 2021, 42, 26–31.

YONG, You et al. The acute toxicity and risk assessment of four multi-combination nicosulfuron to *Apis mellifera* and *Trichogramma ostriniae*. **Asian Journal of Ecotoxicology**, n. 6, p. 298-306, 2018.

ZEMOLIN, C. R. et al. Environmental fate of S-metolachlor: a review. **Planta daninha**, v. 32, p. 655-664, 2014. ZHANG, Anping et al. Residues of currently and never used organochlorine pesticides in agricultural soils from Zhejiang Province, China. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 60, n. 12, p. 2982-2988, 2012.