

A close-up photograph of a hand watering a small green seedling in soil. The hand is positioned at the top, with water dripping from the fingers onto the plant. The background is a warm, golden-brown color, suggesting a sunset or sunrise. The overall scene is illuminated with soft, warm light, creating a sense of care and nurturing.

Carlos Antônio dos Santos
Júlio César Ribeiro
(Organizadores)

Desafios e Sustentabilidade no Manejo de Plantas

 **Atena**
Editora
Ano 2019

Carlos Antônio dos Santos
Júlio César Ribeiro
(Organizadores)

Desafios e Sustentabilidade no Manejo de Plantas

Atena Editora
2019

2019 by Atena Editora
Copyright © Atena Editora
Copyright do Texto © 2019 Os Autores
Copyright da Edição © 2019 Atena Editora
Editora Executiva: Prof^a Dr^a Antonella Carvalho de Oliveira
Diagramação: Rafael Sandrini Filho
Edição de Arte: Lorena Prestes
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Conselho Editorial

Ciências Humanas e Sociais Aplicadas

Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof^a Dr^a Cristina Gaio – Universidade de Lisboa
Prof. Dr. Deyvison de Lima Oliveira – Universidade Federal de Rondônia
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná
Prof^a Dr^a Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense
Prof^a Dr^a Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins
Prof^a Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof^a Dr^a Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará
Prof^a Dr^a Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano
Prof^a Dr^a Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof^a Dr^a Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas

Ciências Biológicas e da Saúde

Prof. Dr. Benedito Rodrigues da Silva Neto – Universidade Federal de Goiás
Prof.^a Dr.^a Elane Schwinden Prudêncio – Universidade Federal de Santa Catarina
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. José Max Barbosa de Oliveira Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Conselho Técnico Científico

Prof. Msc. Abrãao Carvalho Nogueira – Universidade Federal do Espírito Santo
Prof. Dr. Adaylson Wagner Sousa de Vasconcelos – Ordem dos Advogados do Brasil/Seccional Paraíba
Prof. Msc. André Flávio Gonçalves Silva – Universidade Federal do Maranhão
Prof.ª Drª Andreza Lopes – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento Acadêmico
Prof. Msc. Carlos Antônio dos Santos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Msc. Daniel da Silva Miranda – Universidade Federal do Pará
Prof. Msc. Eliel Constantino da Silva – Universidade Estadual Paulista
Prof.ª Msc. Jaqueline Oliveira Rezende – Universidade Federal de Uberlândia
Prof. Msc. Leonardo Tullio – Universidade Estadual de Ponta Grossa
Prof.ª Msc. Renata Luciane Polsaque Young Blood – UniSecal
Prof. Dr. Welleson Feitosa Gazel – Universidade Paulista

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)	
D441	Desafios e sustentabilidade no manejo de plantas [recurso eletrônico] / Organizadores Carlos Antônio dos Santos, Júlio César Ribeiro. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-85-7247-408-5 DOI 10.22533/at.ed.085191806 1. Agricultura – Pesquisa – Brasil. 2. Desenvolvimento sustentável – Brasil. 3. Produção agrícola – Brasil. I. Santos, Carlos Antônio dos. II. Ribeiro, Júlio César. CDD 634.92
Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná - Brasil
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

APRESENTAÇÃO

O Brasil é um país com a produção agrícola consolidada em função dos grandes investimentos tecnológicos realizados, vasta extensão territorial agricultável, ampla biodiversidade, além de clima favorável ao cultivo de inúmeras espécies de importância econômica. Atualmente, com a agricultura brasileira cada vez mais tecnificada, tornou-se necessária a adoção de práticas que assegurem a manutenção dos bons índices produtivos registrados e que, ao mesmo tempo, promovam a sustentabilidade de toda a produção agrícola.

O cultivo agrícola está sujeito a influência de diversos fatores bióticos e/ou abióticos, e que se apresentam como desafios a serem superados nas lavouras de todo o país. Dentro desse contexto, vale destacar a ocorrência de “plantas daninhas” como um dos principais limitantes à produção. Estas plantas, caso não sejam manejadas corretamente, podem trazer inúmeros prejuízos aos produtores em função da competição por água, luz e nutrientes com as culturas de interesse, além de ocasionarem uma série de outras interações negativas.

A continuidade do êxito da produção agrícola brasileira deverá ser baseada, portanto, na capacidade de contornar esses obstáculos e nos investimentos em novas tecnologias e práticas visando aumento da eficiência, sustentabilidade e competitividade a nível mundial. Uma outra demanda em expansão é a exploração sustentável dos recursos disponíveis em nossa flora, e que podem ter importância em segmentos, como o farmacêutico. A exploração dessas espécies vegetais necessita de estudos que validem as suas potencialidades de uso.

Nesta obra “Desafios e Sustentabilidade no Manejo de Plantas” foram selecionados trabalhos que priorizaram essas temáticas e que foram capazes de agrupar, sintetizar e oferecer informações passíveis de utilização por pesquisadores e técnicos. Em uma primeira parte, são apresentados trabalhos que trazem informações e questionamentos sobre estresse em plantas pela aplicação de herbicidas, resistência de “plantas daninhas” a herbicidas, e fitorremediação. Posteriormente, são apresentados trabalhos pontuais que compilam informações e resultados de experiências sobre mistura em tanques, interações e efeito residual de herbicidas.

Na segunda parte da obra é mostrada a eficiência terapêutica de metabólitos secundários da espécie *Achyrocline satureioides*, por meio da compilação e análise de informações disponíveis em bases de dados eletrônicas e da legislação brasileira.

Agradecemos aos autores vinculados às duas grandes instituições brasileiras, UFRRJ e UFSC, pelo empenho ao compartilhar seus conhecimentos e resultados de muitos anos de dedicação e investimentos em pesquisa.

Carlos Antônio dos Santos
Júlio César Ribeiro

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
ESTRESSE EM PLANTAS PELA APLICAÇÃO DE HERBICIDAS	
Junior Borella	
Ana Claudia Langaro	
Amanda dos Santos Souza	
Jéssica Ferreira Lourenço Leal	
Gledson Soares de Carvalho	
Ana Carolina Oliveira Chapeta	
Rayana da Rocha Sarmiento	
Camila Ferreira de Pinho	
DOI 10.22533/at.ed.0851918061	
CAPÍTULO 2	17
RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS A HERBICIDAS	
Ana Claudia Langaro	
Gabriella Francisco Pereira Borges de Oliveira	
Jéssica Ferreira Lourenço Leal	
José Maurício Fajardo da Cunha	
Luana Jéssica da Silva Ferreira	
Juliana Lima Diniz	
Camila Ferreira de Pinho	
DOI 10.22533/at.ed.0851918062	
CAPÍTULO 3	30
FITORREMEDIAÇÃO DE HERBICIDAS	
Amanda dos Santos Souza	
Gabriella Francisco Pereira Borges De Oliveira	
Ana Claudia Langaro	
Monara Abreu Mendes	
Jonathan Almeida Santos Simões	
Junior Borella	
Camila Ferreira De Pinho	
DOI 10.22533/at.ed.0851918063	
CAPÍTULO 4	42
MISTURA EM TANQUE E INTERAÇÕES ENTRE HERBICIDAS	
Jéssica Ferreira Lourenço Leal	
Gabriella Francisco Pereira Borges de Oliveira	
Amanda Dos Santos Souza	
Marcelo Pereira Sampaio	
Eduardo Souza De Amorim	
Ana Claudia Langaro	
Camila Ferreira De Pinho	
DOI 10.22533/at.ed.0851918064	
CAPÍTULO 5	58
EFEITO RESIDUAL DE HERBICIDAS PRÉ-EMERGENTES EM MILHO CULTIVADO EM SUCESSÃO A SOJA	
Gledson Soares de Carvalho	
Samia Rayara de Sousa Ribeiro	
Cristiano Viana André	
Felipe Sant'Ana Marinho	

Mariana Araújo Alves Gomes de Souza
Monique Macedo Alves
Camila Ferreira de Pinho

DOI 10.22533/at.ed.0851918065

CAPÍTULO 6 69

EFICIÊNCIA TERAPÊUTICA DE METABÓLITOS SECUNDÁRIOS DE *Achyrocline satureioides*

Aline Nunes
Caroline Schmitz
Deise Munaro
Marcelo Maraschin

DOI 10.22533/at.ed.0851918066

SOBRE OS ORGANIZADORES..... 79

ESTRESSE EM PLANTAS PELA APLICAÇÃO DE HERBICIDAS

Junior Borella

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Ana Claudia Langaro

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Amanda dos Santos Souza

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Jéssica Ferreira Lourenço Leal

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Gledson Soares de Carvalho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Ana Carolina Oliveira Chapeta

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Rayana da Rocha Sarmiento

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Camila Ferreira de Pinho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

RESUMO: Herbicidas são produtos utilizados no manejo de plantas indesejáveis (plantas daninhas) no ecossistema, que atuam inibindo processos bioquímicos específicos nos vegetais, que de forma seletiva, controlam algumas espécies de plantas daninhas, enquanto não causam injúrias em plantas cultivadas.

Os herbicidas podem ser classificados de acordo com a forma com que atuam nas plantas, sendo divididos em mecanismos de ação. Os diferentes mecanismos de ação incluem inibidores de fotossistemas, inibidores biossintéticos, disruptores hormonais, indutores de metabolismo e ainda aquelas que possuem efeito sobre o genoma das plantas. No entanto, as respostas das plantas podem ser bem amplas a um único herbicida, variando desde nenhuma resposta; estresse transiente quando o herbicida é metabolizado ou a enzima inibida é substituída pela via *de novo* síntese; seja por curto período de estresse, ocorrendo rápida recuperação; até impactos letais severos ocasionados, principalmente pela produção de espécies reativas de oxigênio que levam a peroxidação de lipídeos de membrana e consequentemente a morte da planta.

PALAVRAS-CHAVE: fisiologia de herbicidas, mecanismo de ação, estresse oxidativo.

ABSTRACT: Herbicides are products used in the management of undesirable plants (weeds) in the ecosystem, by inhibiting specific biochemical processes in plants, which selectively control some weed species, while not causing injuries in cultivated plants. The herbicides are classified according to the way they act in the plants, being divided into mode of action. Different mode of action includes

photosystems inhibitors, biosynthetic inhibitors, hormone disruptors, metabolism inducers and even those having an effect on plant genome. However, plant responses may be quite broad to a single herbicide, ranging from no response; transient stress when the herbicide is metabolized or the inhibited enzyme is replaced by the newly synthesized pathway; either for a short period of stress, and rapid recovery occurs; to severe lethal impacts caused mainly by the production of reactive oxygen species that lead to the lipid membrane peroxidation and consequently the death of the plant.

KEYWORDS: Herbicide physiology, mode of action, oxidative stress.

1 | INTRODUÇÃO

Plantas são frequentemente expostas a condições ambientais adversas que interferem no crescimento, desenvolvimento e produtividade. O estresse pode ser biótico, quando imposto por outro organismo, ou abiótico, decorrente de alterações químicas ou físicas do ambiente, como salinidade, luz, água e etc. Herbicidas, em contraste, representam um estresse imposto às plantas pela atividade antrópica.

Herbicidas são produtos utilizados no manejo de plantas indesejáveis no ecossistema, referidas comumente como “plantas daninhas”. Embora possam ser encontradas muitas definições para o termo plantas daninhas, será aplicado como sendo “uma planta que ocorre em local indesejado e acarreta em dano econômico as culturas de interesse comercial”. Dessa forma, as plantas daninhas dividem-se em comuns e verdadeiras.

As plantas daninhas apresentam níveis substanciais de variabilidade genética e plasticidade que as permitem instalar, reproduzir e se estabelecer em novos ambientes. A maioria dos herbicidas para o controle das plantas daninhas foram descobertos através de *screening* em casa de vegetação que, embora, muitas vezes empíricos, levou satisfatoriamente a descoberta de moléculas que afetam processos bioquímicos específicos nos vegetais, que de forma seletiva, controlam algumas espécies (plantas daninhas), enquanto não causam injúrias em outras (plantas cultivadas).

Desde sua descoberta, os herbicidas representam uma ferramenta valiosa para investigar a fisiologia, metabolismo e genética de plantas. Embora as respostas das plantas aos herbicidas sejam extremamente variáveis, elas dependem de três aspectos inter-relacionados da espécie- alvo e do processo bioquímico alvo: (1), os herbicidas usados atualmente representam mais de 40 famílias químicas e aproximadamente 30 vias metabólicas ou enzimas alvo. As respostas das plantas podem ser bem amplas a um único herbicida, variando desde nenhuma resposta ou sintoma a um curto período de estresse, ocorrendo rápida recuperação, até impactos letais severos; (2), certas espécies de plantas daninhas são parcialmente sensíveis aos herbicidas, ocorrendo efeitos agudos ou longos períodos de estresse e, ainda, sobrevivem. Nesse caso, os herbicidas desencadeiam uma ampla gama de respostas de defesa nas plantas, sejam em famílias ou espécie única; (3). herbicidas seletivos podem induzir estresse

nas cultivares, levando as espécies a induzirem sistemas catabólicos para degradar os xenobióticos. Dessa forma, as cultivares passam por estresse transiente quando o herbicida é metabolizado ou a enzima inibida é substituída pela via *de novo* síntese.

Os herbicidas são utilizados com o objetivo de reduzir a população de plantas daninhas a um nível aceitável que não cause dano as culturas. Dos pesticidas utilizados, os herbicidas representam cerca de 60% e são usados no controle de plantas em milhões de hectares. Muitos herbicidas apresentam longo período residual no solo que estendem sua ação na germinação de sementes e crescimento de plântulas ao longo das estações de crescimento, podendo permanecer por anos no ambiente. Além disso, considerando que o uso de herbicidas despontou apenas nos últimos 50 anos, representam uma nova forma de estresse nas plantas.

Os herbicidas podem ser classificados quanto a seletividade, modo de aplicação, translocação e mecanismo de ação. Quanto a seletividade, são seletivos e não seletivos. Exemplos de herbicidas não seletivos são o glifosato, paraquat e glufosinato de amônio. Quanto ao modo de aplicação podem ser divididos em pré e pós emergentes. Já em relação a translocação, podem ter ação de contato, o que exige uma boa cobertura foliar no momento da aplicação, ou ser sistêmicos e translocar via floema e/ou xilema. Além dessa divisão, os herbicidas podem ser classificados de acordo com a forma com que atuam nas plantas, sendo divididos em mecanismos de ação. Os diferentes mecanismos de ação incluem inibidores de fotossistemas, inibidores biossintéticos, disruptores hormonais, indutores de metabolismo e ainda aquelas que possuem efeito sobre o genoma das plantas.

2 | MECANISMO DE AÇÃO DE HERBICIDAS EM PLANTAS

2.1 Inibidores de fotossistema I

São herbicidas pertencentes ao grupo bipiridílio, sendo o paraquat o herbicida mais conhecido e utilizado no controle de plantas daninhas. Ocasionalmente causa rápida murcha e dessecação da planta. Embora o mecanismo de ação não esteja completamente elucidado, o paraquat se liga a ferredoxina na via do fotossistema I, alterando o fluxo normal de elétrons do NADP⁺ e fornecendo estes ao oxigênio molecular, produzindo espécies reativas de oxigênio (BROMILOW, 2004).

2.2 Inibidores de fotossistema II

Os herbicidas inibidores do fotossistema II pertencem aos grupos das triazinas, ureias e uracilas (aplicados em solo); bentazon, bromoxinil, desmedifam, fenmedifam e propanil (aplicação foliar). O mecanismo de ação consiste no bloqueio no fluxo de elétrons da quinona A para a quinona B, na proteína D1 no fotossistema II. O bloqueio do fluxo de elétrons interrompe a conversão de energia luminosa em energia

eletroquímica (ATP e NADPH) e, conseqüentemente as reações de carboxilação do CO₂. A alta produção de espécies reativas de oxigênio e conseqüente peroxidação de lipídeos nas células leva a morte das plantas (BROMILOW, 2004).

2.3 Inibidores de PROTOX

Os herbicidas dos grupos difenileter, oxidiazon e N-fenilheterociclo atuam na inibição da enzima cloroplastídica Protoporfirinogênio IX oxidase (PROTOX), uma proteína ligada a membrana e envolvida na biossíntese de moléculas de clorofila e grupo heme (JACOBS & JACOBS, 1993). A inibição da flavoproteína PROTOX leva ao acúmulo de protoporfirinogênio IX, que, por sua vez, se difunde do cloroplasto para o citosol, onde é oxidada não enzimaticamente e interage com oxigênio e luz formando oxigênio singleto e espécies reativas de oxigênio, causando peroxidação de lipídeos, rompimento de membrana e morte celular (HAN et al., 1995).

2.4 Inibidores da síntese de carotenoides

Os herbicidas inibem enzimas da rota biossintética de carotenoides, fitoeno desaturase, 4-hidroxifenil-piruvato-dioxigenase (HPPD), 1-deoxi-D-xilulose 5-fosfato sintase (DOXP). A inibição das enzimas resulta em clorose foliar devido a fotoxidação da clorofila na ausência de carotenoides. Biossíntese de clorofila e montagem de pigmentos proteicos nos tilacoides são indiretamente prejudicados (SANDMANN & BÖRGER, 1987).

2.5 Mimetizadores de auxina

Os herbicidas comercialmente importantes são representados pelos grupos que incluem os fenóis (2,4-D) benzóis (dicamba e clorambem), piridinas (picloram e fluroxipir) e quinolinas (quinclorac) apresentando ação fitohormonal, por se tratar de auxina sintética, com ação similar ao hormônio ácido indol 3-acético (AIA). Os herbicidas auxínicos controlam dicotiledôneas e são seletivos para monocotiledôneas, as quais são tolerantes a esses herbicidas devido ao metabolismo e locação dos tecidos meristemáticos ou na indução da síntese do hormônio etileno, ocasionando redução do crescimento das plantas por alterar o metabolismo de ácidos nucleicos e a plasticidade da parede celular. Sintomas comuns em plantas pela aplicação desses herbicidas incluem o encarquilhamento das folhas, produção de etileno, epinastia dos tecidos, superexpressão de genes induzidos por auxinas com indução do metabolismo (FEDTKE, 1982).

2.6 Inibidores de ALS

Os herbicidas dos grupos sulfonilureia, imidazolinonas, triazolopirimidinas e sulfonanilidonas atuam na inibição da enzima acetolactato sintase (ALS), também conhecida como ácido acetohidroxiácido sintase (AAHS). A enzima ALS catalisa a

primeira reação da rota biossintética de produção de aminoácidos de cadeia ramificada, leucina, isoleucina e valina (LAROSSA & SCHLOSS, 1984). A inibição da enzima leva a morte das plantas por efeitos fitotóxicos pelo acúmulo de precursores da rota e a depleção de aminoácidos de cadeia ramificada ocasionando reduções na produção e deficiência funcional de proteínas. Também, ocasiona uma reação de consumo de oxigênio, levando a inativação oxidativa e autodestruição enzimática. A divisão celular cessa rapidamente pela inibição das fases G1 e G2 devido à ausência de leucina. Inibição da síntese de DNA pela repressão de genes que codificam enzimas da rota biossintética de nucleotídeos também é verificada em função da aplicação de herbicidas inibidores da ALS (DUGGLEBY & PANG, 2000).

2.7 Inibidores de EPSPs

É representado pelo glifosato, que inibe a enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs), penúltima enzima da via do chiquimato de produção de aminoácidos aromáticos (fenilalanina, triptofano e tirosina). O acúmulo de glifosato nos meristemas inibe o crescimento como resultado da perda de biossíntese de proteínas. Além de proteínas, importantes componentes são negativamente afetados, como respostas de sinalização celular e de defesa contra patógenos, como a produção de fenilpropanoides, fitoalexinas e lignina. O glifosato é um herbicida não seletivo, sendo letal a todas as espécies. É translocado eficientemente e acumula nos meristemas, sendo uma excelente opção no controle de daninhas perenes (DYER & WELLER, 2005).

2.8 Inibidores de GS

As plantas convertem nitrogênio inorgânico em compostos orgânicos pela adição de amônia em moléculas de glutamato originando glutamina, via catalise da enzima glutamina sintetase (GS), majoritariamente nos cloroplastos. O herbicida inibidor da GS é o glufosinato de amônio, que leva a um rápido acúmulo de amônia em níveis tóxicos as células. Além da toxicidade gerada pelo acúmulo de amônia, reduções no conteúdo de aminoácidos levam a redução da dissipação do fluxo de elétrons na cadeia de transporte de elétrons (CTE) da fotossíntese para a via fotorrespiratória, sobrecarregando a CTE. O acúmulo de compostos da via fotorrespiratória leva indiretamente a produção de espécies reativas de oxigênio que causam a peroxidação de lipídeos e morte da planta (SHERMAN et al., 1996).

2.9 Inibidores de ACCase

Os herbicidas das famílias químicas ariloxifenoxipropionatos e ciclohexanodionas inibem a enzimas acetil CoA-carboxilase (ACCCase), a primeira enzima da rota biossintética de ácidos graxos. A ACCCase catalisa a carboxilação do acetil-CoA dependente de ATP para formar malonil-CoA que é utilizado, também, no

alongamento de lipídeos e síntese de metabólitos secundários. Duas isoformas da enzima são encontradas em plantas, um heterodímera que é insensível ao herbicida e outra homodímera (plastídica) que é sensível ao herbicida para o controle de plantas específicas, como membros de Poaceae em cultivos de dicotiledôneas (SASAKI & NAGANO, 2004).

2.10 Inibidores de ácidos graxos de cadeia longa

Dentre os inibidores de ácidos graxos de cadeia longa podemos citar as cloroacetamidas, as quais inibem o desenvolvimento inicial de plântulas, primariamente a emergência e o alongamento da parte aérea por inibir diversas enzimas elongases, como a Ácido graxo de cadeia longa:CoA ligase, inibindo a síntese de lipídeos de membranas e consequente deposição de ceras (cutícula) (TRENKAMP et al., 2004). São também denominados inibidores da divisão celular ou inibidores de parte aérea.

2.11 Inibidores mitóticos

Neste grupo estão incluídas as dinitroanilinas, as quais ligam-se nos monômeros de tubulina, inibindo a sua polimerização em microtúbulos e impedindo o movimento normal dos cromossomos durante a divisão celular mitótica na germinação de sementes e, levando a morte de plântulas antes da emergência por impedir o crescimento de raízes e pelos radiculares (GODDARD et al., 1994).

3 | ESTRESSE OXIDATIVO EM PLANTAS PELA APLICAÇÃO DE HERBICIDAS

A ação herbicida pode ser descrita como uma interação fisiológica e bioquímica entre um herbicida e a planta. Quando o herbicida é absorvido, diversas alterações no metabolismo podem ocorrer, sendo a principal delas a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), e consequentemente o estresse oxidativo.

O oxigênio molecular (O_2) possui baixa reatividade devido à configuração paralela de seus elétrons nos dois últimos orbitais incompletos. No estado fundamental, o oxigênio é tripleto (3O_2) com dois elétrons não pareados, de mesmo *spin*, em diferentes orbitais. A ativação e rotação de um dos elétrons desemparelhados pode ser revertida por excitação e formar oxigênio singleto (1O_2). Esta organização impõe que a redução do O_2 deve ser efetuada por transferências consecutivas de um elétron. Os produtos resultantes da redução do O_2 são altamente reativos e recebem a denominação de EROs (KOVALCHUK, 2010). As EROs são normalmente referidas como subprodutos de reações redox que se apresentam tanto como radicais livres, como na forma molecular de um não radical. Essas moléculas podem ser geradas como resultado de excitação, formando oxigênio singleto, ou de sucessivas adições de elétrons ao O_2 , reduzindo-o ao radical aniônico superóxido $O_2^{\cdot-}$ ou peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila (OH^{\cdot}).

O conjunto de reações através das quais o $O_2^{\cdot-}$, o H_2O_2 e o Fe^{2+} rapidamente geram OH^{\cdot} é conhecido como “reação de Haber-Weiss”, enquanto que a reação final, a oxidação do H_2O_2 pelo Fe_{2+} , é denominada reação de Fenton (GILL & TUTEJA, 2010). Essas reações podem ocorrer na presença dos íons ferro ou cobre (BHATTACHARJEE, 2010).

O H_2O_2 é uma EROs moderadamente reativa com meia-vida relativamente longa (1 ms) e cujo pequeno tamanho permite-lhe atravessar membranas celulares e migrar em compartimentos diferentes. Dessa forma, difunde os danos e também atua como mensageiro da condição de estresse. O H_2O_2 desempenha duplo papel em plantas: em baixas concentrações, atua como molécula envolvida na sinalização de aclimação desencadeando tolerância a vários estresses bióticos e abióticos e, em altas concentrações, leva a morte programada da célula (MA et al., 2013). Além disso, o H_2O_2 tem se mostrado também como regulador chave em diversos processos fisiológicos, tais como a senescência (PENG et al., 2005), fotorrespiração e fotossíntese (NOCTOR & FOYER, 1998), movimento estomático (BRIGHT et al., 2006), do ciclo celular (MITTLER et al., 2004) e do crescimento e desenvolvimento (FOREMAN et al., 2003).

O H_2O_2 tem ação deletéria, porque participa da reação formadora de OH^{\cdot} , o oxidante mais reativo na família das EROs. Além disso, o H_2O_2 é capaz de inativar enzimas por oxidação de seus grupos tiol (GADJEV et al., 2008). O radical OH^{\cdot} é considerado a mais oxidante dentre as EROs e sua alta reatividade resulta em reações rápidas e inespecíficas com distintos substratos, podendo potencialmente reagir com todos os tipos de moléculas biológicas (MYLONA & POLIDOROS, 2010).

Sob condições normais, as EROs são geradas pelo metabolismo dos organismos aeróbicos, principalmente através da fotossíntese e respiração, porém mantidos em níveis basais através de sistemas antioxidantes de defesa (GRATÃO et al., 2005). Quando esse aumento é maior que a capacidade antioxidante da célula, caracteriza-se o processo de estresse oxidativo (PANDHAIR & SEKHON, 2006). Se mantido em níveis relativamente baixos, é provável que funcione como componentes da via de sinalização de estresse, desencadeando defesa ao estresse ou respostas de aclimação (CARVALHO, 2008).

A fotorrespiração é a principal fonte de H_2O_2 em células fotossintéticas. A geração peroxissomal de H_2O_2 pode servir como mecanismo de transferência de sinal proveniente da fotossíntese para o resto da célula (FOYER et al., 2009). Mesmo sob condições normais, a formação de H_2O_2 pela cadeia de transporte de elétrons fotossintética de plantas C_3 é da ordem de $4 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e, nos peroxissomos, na via fotorrespiratória, é de $10 \text{ mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (FOYER & SHIGEOKA, 2011).

Herbicidas que interferem na cadeia de transporte de elétrons, tanto pela inibição do fotossistema II ou pela captação de elétrons no fotossistema I, induzem ação fitotóxica pela ativação molecular do oxigênio. Quando a redução da plastoquinona é inibida pelo herbicida, a energia de excitação não pode ser dissipada de maneira

usual. A emissão de calor e fluorescência atinge o máximo e a clorofila é acumulada na forma mais estável, clorofila triplete ($^3\text{Chl}^*$) (FUFEZAN et al., 2002). O excesso de clorofila em estado triplete pode reagir com o oxigênio para formar o oxigênio singleto, altamente reativo, o qual pode induzir perda de pigmentos e peroxidação lipídica (DEVINE et al., 1993).

Herbicidas podem interferir na fotossíntese normal pela inibição da síntese de carotenoides e resultam na degradação fotooxidativa e na destruição de membranas fotossintéticas (WAKABAYASHI & BÖGER, 2004). As mais importantes enzimas alvo dos herbicidas que afetam a biossíntese de carotenoides são as desaturases. Inibidores de carotenoides que interferem com diferentes tipos de pigmentos no cloroplasto (carotenoides e clorofilas) podem exercer a sua ação fitotóxica pela ativação e aumento das EROs de maneira indireta, devido a incapacidade de dissipação do excesso de luz (WAKABAYASHI & BÖGER, 2004).

Outro mecanismo de produção de EROs é fornecido pela drenagem de elétrons induzida por herbicidas do tipo bipyridilos (paraquat). Estes herbicidas reagem com o oxigênio molecular para produzir o radical superóxido (chamada de reação de Melher). O O_2^- pode também começar uma cadeia de oxidações e peroxidações que estabelecem a ação herbicida (SUNTRES, 2002). Neste caso a ação fitotóxica do herbicida é devido a canalização de elétrons dos fotossistemas até o oxigênio.

A enzima protoporfirinogênio oxidase presente nos cloroplastos e mitocôndrias tem sido escolhida como alvo de ação de herbicidas. Após inibida, o porfirinogênio difunde-se fora do sítio onde se encontra a enzima que o metaboliza e está sujeito a aromatização oxidativa que o converte em protoporfirina IX. O acúmulo deste metabólito causa a formação de $^1\text{O}_2$ na presença de luz com a consequente geração de estresse oxidativo (DEVINE et al., 1993).

Após a entrada do herbicida na planta, a molécula poderá ser metabolizada a compostos secundários sem atividade ou com atividade reduzida. Normalmente os mecanismos de desintoxicação de herbicidas incluem metabolismo enzimático e transformação desses compostos em substâncias menos tóxicas. Entre as enzimas pode-se citar a glutathione-S-transferase, que atua na conjugação de herbicidas e/ou moléculas tóxicas com os peptídeos de glutathione inativando ou reduzindo a fitotoxidez de determinada molécula (EDWARDS et al., 2000).

Embora o aumento da produção de EROs na célula representa ameaça para as biomoléculas celulares, também atuam como moléculas sinalizadoras e ativam genes relacionados a vias de sinalização (DUBEY, 2011). Para sobreviver a tais restrições, as plantas possuem diversos mecanismos que lhes permitem perceber e traduzir sinais externos, a fim de desencadear respostas adaptativas (MILLER et al., 2011). Dessa forma, as plantas desenvolveram dois mecanismos de proteção, um sistema antioxidante enzimático e outro não enzimático (MITTLER, 2002), os quais incluem enzimas antioxidantes e metabólitos que detoxificam essas formas de EROs, além de mecanismo que dissipa o excesso de energia absorvida antes da formação de

oxigênio singlete. A partição entre estes dois sistemas sob condições de estresse pode ser regulada pela concentração de O_2 no sistema (BLOKHINA et al., 2003).

4 | MECANISMO DE DEFESA ANTIOXIDATIVA

O mais importante mecanismo de detoxificação das EROs inclui a atividade das enzimas superóxido dismutase (SOD), ascorbato peroxidase (APX) e catalase (CAT). Várias destas enzimas podem ser induzidas, inibidas ou ativadas por efetores endógenos (GRATÃO et al., 2005). O balanço entre as atividades da SOD, peroxidases e CAT, é crucial para se determinar os níveis basais de radicais $O_2^{\cdot-}$ e H_2O_2 . Este balanço junto com o sequestro de íons metálicos previne a formação de OH^* nas reações de Haber-Weiss e Fenton (MITTLER, 2002).

As SODs são metalo-enzimas consideradas a primeira linha de defesa contra as EROs e que catalisam a dismutação de dois radicais $O_2^{\cdot-}$, gerando H_2O_2 e O_2 . Essas enzimas participam da modulação do nível de H_2O_2 em cloroplastos, mitocôndrias, citosol e peroxissomos (MITTLER, 2002). Uma vez que dismutam o $O_2^{\cdot-}$, agem indiretamente na redução do risco de formação do OH^* a partir do $O_2^{\cdot-}$ (DUBEY, 2011). São classificadas de acordo com seus cofatores metálicos: cobre e zinco (Cu/Zn-SOD), manganês (Mn-SOD) e ferro (Fe-SOD) (GILL & TUJETA, 2010). Em geral, as plantas contêm uma Mn-SOD localizada na matriz mitocondrial e uma Cu/Zn-SOD citosólica, com Fe-SOD e/ou Cu/Zn-SOD, presentes no estroma do cloroplasto. O número de isoenzimas de cada tipo de SOD varia muito de planta para planta, assim como a abundância relativa de cada enzima (BOWLER et al., 1992).

A CAT é uma das principais enzimas que atuam na eliminação do H_2O_2 gerado durante a fotorrespiração e a β -oxidação dos ácidos graxos, sendo encontrada nos peroxissomos, glioxissomos e mitocôndrias e converte duas moléculas de H_2O_2 a H_2O e oxigênio molecular (DUBEY, 2011). As plantas possuem várias isoformas de CAT, as quais podem dismutar diretamente o H_2O_2 ou oxidar substratos, tais como metanol, etanol, formaldeído e ácido fórmico. Como a CAT opera sem agente redutor, ela fornece às plantas uma forma energeticamente eficiente para remoção do H_2O_2 (SHARMA et al., 2012). A atividade da CAT é efetiva, principalmente, em concentrações relativamente altas de H_2O_2 (mM), por isso são consideradas indispensáveis para a detoxificação de EROs, especialmente em condições de estresse severo, quando os níveis de H_2O_2 estão maiores. No entanto, esta enzima é menos sensível que as peroxidases, ou seja, tem menor afinidade pelo H_2O_2 , sendo o estresse muitas vezes insuficiente para sua ativação. Em situações de elevado estresse oxidativo pode ocorrer ainda a inibição de sua síntese ou mudança na conformação de suas subunidades. A APX e a CAT são as enzimas mais importantes dentre os componentes de desintoxicação do H_2O_2 (BHATT & TRIPATHI, 2011).

O termo peroxidases (POX) inclui grupo de enzimas capazes de catalisar a

oxidação de componentes celulares, tais como H_2O_2 ou peróxidos orgânicos. Dentre elas encontra-se a APX, a qual, em plantas, possui função de proteção antioxidativa. A atividade de peroxidases pode aumentar em plantas submetidas a diversos tipos de estresse (SIEGEL, 1993) e pode ser tomada como marcador bioquímico de estresse resultante tanto de fatores bióticos como abióticos (LIMA et al., 1999).

Estas enzimas catalisam a transferência de elétrons ao H_2O_2 usando diferentes substratos reduzidos como doadores. As POXs de plantas aumentam em resposta a vários estresses bióticos e abióticos, participam no catabolismo de auxinas e em processos de síntese de parede celular como a oxidação de fenóis, suberização e lignificação em plantas hospedeiras durante a reação de defesa contra patógenos (SYROS et al., 2004). O paraquat, um herbicida gerador de estresse oxidativo, induz também este tipo de enzimas (KWAK et al., 1996).

Em plantas, o mais importante redutor para o H_2O_2 é o ascorbato, sendo que a APX usa duas moléculas de ascorbato para reduzir o peróxido de hidrogênio à água, com a geração concomitante de duas moléculas de monodehidroascorbato (MDHA) (NOCTOR & FOYER, 1998). Além disso, essa enzima possui alta afinidade com o H_2O_2 , com uma constante de Michaelis-Menten (KM) na ordem de μM , permitindo a eliminação do H_2O_2 mesmo em baixas concentrações (LOCATO et al., 2010).

Estudos realizados com alguns herbicidas mostraram comportamentos diferentes na atividade de enzimas antioxidantes (EKMEKCI & TERZIOGLU, 2005). Geralmente, a resposta antioxidante varia de acordo com o modo de ação do herbicida aplicado e do cultivo. Assim, o papel das enzimas antioxidantes em situações de estresse é o de controlar o acúmulo de EROs e assim limitar os danos oxidativos (MITTLER, 2002; SHARMA et al., 2012). Tais antioxidantes podem evitar a formação de radicais livres, sequestrá-los ou promover sua degradação, prevenindo a ocorrência de danos às células das plantas (SERKEDJIEVA, 2011).

No sistema antioxidante não enzimático está incluído principalmente o grupo dos compostos fenólicos, que são sintetizados pelas plantas em resposta a injúria física, infecção por bactéria, fungo, nematoides, vírus ou qualquer outro tipo de estresse. Antioxidantes não enzimáticos são encontrados em todos os compartimentos celulares e os mais importantes são o ácido ascórbico (vitamina C) e a glutathiona (GSH), os quais têm propriedades hidrofílicas. O ácido ascórbico, em pH fisiológico, tem estrutura de enediol na sua base conjugada, podendo reagir como doador monovalente. A formação de radical ascorbil, pela doação de um elétron, produz deslocamento eletrônico altamente estável. Logo, uma dismutação espontânea é produzida para formar ascorbato e deidroascorbato. Este último é convertido a ascorbato em outras vias metabólicas (CHAUDIÈRE & FERRARI-ILIOU, 1999).

Antioxidantes hidrofóbicos são encontrados em lipoproteínas e membranas onde interrompem a propagação da peroxidação lipídica eliminando radicais peroxil e bloqueiam a formação de hidroperóxidos a partir do 1O_2 . Entre estes se destacam a vitamina E, carotenoides e possivelmente, ubiquinol na forma reduzida da coenzima Q

(CHAUDIÈRE & FERRARI-ILIOU, 1999).

As clorofilas (a e b) e os carotenoides são os pigmentos fotossintéticos mais abundantes existentes no planeta. Por sua estrutura química ser instável, as clorofilas são facilmente degradadas, resultando em produtos de decomposição que modificam a percepção e qualidade dos vegetais (GONÇALVES, 2008).

As clorofilas localizam-se nos cloroplastos, sendo esta organela o local no qual se realiza a fotossíntese, a qual possui duas reações importantes: a fotoquímica, nas membranas dos tilacoides e a bioquímica, no estroma do cloroplasto. Tais organelas, além das clorofilas, contêm outros pigmentos denominados acessórios, tais como os carotenoides (LARCHER, 2000). Os danos às clorofilas conduzem a disfunção celular, lesões necróticas ou ainda morte celular (FOYER & NOCTOR, 2009; SHARMA et al., 2012). Como consequência, os danos oxidativos traduzem-se nas folhas pelo aparecimento de áreas cloróticas que, em muitos casos, evoluem para necrose e abscisão foliar (CAVATTE et al., 2012).

Os carotenoides constituem outro grande grupo de antioxidantes hidrofóbicos, que se caracterizam por serem constituídos de longas cadeias de hidrocarbonetos com duplas ligações conjugadas (KRINSKY, 1989). Esta propriedade permite a ancoragem nas membranas fosfolipídicas. Também a estrutura dos conjugados permite deslocar elétrons desemparelhados e atuar como doadora de elétrons monovalentes. Essa mesma estrutura conjugada é responsável pela drenagem da energia de ativação do 1O_2 . Sendo assim, decréscimo na sua biossíntese poderá causar danos às plantas (HAVAUX & NIYOGI, 1999).

Outros componentes presentes no sistema antioxidante são os aminoácidos, os quais possuem relativamente baixa atividade antioxidante, mas quando presentes em altas concentrações podem contribuir para desintoxicação das EROs. Os exemplos mais destacados são os aminoácidos livres, peptídeos e proteínas. Praticamente todos os aminoácidos podem servir como alvos para ataque oxidativo, porém alguns aminoácidos como triptofano, tirosina, histidina e cisteína são particularmente sensíveis as EROs. Devido ao fato da concentração acumulada de aminoácidos livres ser da ordem de 10^{-1} M, estes são quantitativamente importantes como desintoxicadores de EROs (DRÖGE, 2002).

O aumento nos teores de aminoácidos tem sido relatado em vários trabalhos quando expostos aos agentes de estresse (DRÖGE, 2002). Possíveis explicações sobre os aumentos observados no teor de aminoácidos incluem a inibição da síntese de proteínas, aumento da hidrólise de proteínas, decréscimo do uso de aminoácidos como fonte de carbono respiratório e/ou aumento da biossíntese de aminoácidos (COOLEY & FOY, 1992).

A oxidação mediada pelas espécies reativas de oxigênio de alguns resíduos de aminoácidos como a lisina, arginina e prolina, leva à formação de grupos carbonil (UCHIDA et al, 2002). Grupos carbonil também podem ser formados como consequência de reações secundárias de cadeias laterais de alguns aminoácidos com produtos de

oxidação lipídica, ou açúcares reduzidos ou seus produtos de oxidação (BAYNES & THORPE, 1999).

O metabolismo da prolina está envolvido na regulação do potencial redox intracelular e no armazenamento e transferência de energia e poder redutor (SHARMA et al., 2012). Alteração no metabolismo da prolina pode ser mais benéfica para a tolerância das plantas ao estresse ambiental do que as propriedades do aminoácido. A biossíntese da prolina ocorre no citoplasma das células vegetais, mas é possível que a produção se desloque para cloroplastos sobre condições de estresse, sendo capaz de detoxificar o radical hidroxila (SIGNORELLI et al., 2014).

A prolina tem funções como osmólito, detoxificador de radicais, dreno de elétrons, estabilizador de macromoléculas e componente da parede celular (MATYSIK et al., 2002). De acordo as suas propriedades químicas, a prolina pode estar envolvida em estresse provocado por metais, por mecanismos de regulação osmótica e redox, complexação de metais e desintoxicação de EROs (SHARMA et al., 2012). Este aminoácido é sintetizado à partir de glutamato em três reações exergônicas, consumindo ATP e NADPH. O consumo relativamente elevado de NADPH e o acúmulo de prolina constituem mecanismo de canalização do excesso de elétrons (HELDT, 1997).

O conteúdo de prolina tem sido estudado como resposta de plantas a estresses abióticos. Muitas plantas acumulam prolina em condições de déficit hídrico, salinidade, temperaturas extremas e alguns outros estresses ambientais, especialmente aqueles provocados por metais de transição Cu, Cd e Zn (CHEN et al., 2001).

Através desses dois sistemas de defesa, as plantas são capazes de perceber os sinais e ativar seu sistema, enzimático e não-enzimático, a fim de eliminar ou reduzir as EROs decorrentes da utilização de herbicidas. O entendimento desses dois mecanismos é crucial para adoção de estratégias de controle, visando o menor estresse das plantas cultivadas.

REFERÊNCIAS

BAYNES, J.W.; THORPE, S.R. **Role of oxidative stress in diabetic complications: a new perspective on an old paradigm.** *Diabetes*, v. 48, p. 1-9, 1999.

BHATT, I.; TRIPATHI, B.N. **Plant peroxiredoxins: catalytic mechanisms, functional significance and future perspectives.** *Biotechnology Advances*, v. 29, p. 850-859, 2011.

BLOKHINA, O.; VIROLAINEN, E.; FAGERSTEDT, K. V. **Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review.** *Annals of Botany*, v. 91, p. 179-194, 2003.

BOWLER, C.; MONTAGU, M.V.; INZE, D. **Superoxide dismutase and Stress tolerance.** *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 43, p. 83-11, 1992.

BRIGHT, J.; DESIKAN, R.; HANCOCK, J.T.; WEIR, I.S.; NEILL, S.J. **ABA-induced NO generation and stomatal closure in Arabidopsis are dependent on H₂O₂ synthesis.** *The Plant Journal*, v. 45, p. 113-122, 2006.

- BROMILOW, R.H. **Paraquat and sustainable agriculture**. Pest Management Science, v. 60, p. 340-349, 2004.
- CARVALHO M.H.C. **Drought stress and reactive oxygen species: production, scavenging and signaling**. Plant Signaling and Behavior, v. 3, p. 156-165, 2008.
- CAVATTE, P.C.; MARTINS, S.C.V.; MORAIS, L.E.; SILVA, P.E.M.; DAMATTA, F.M. **The physiology of abiotic stresses plant breeding for abiotic stress tolerance**. In: FRITSCHÉ-NETO, R.; BORÉM, A. (Eds.). Plant breeding for abiotic stress tolerance. 102ed. Springer, 2012. p 21-51.
- CHAUDIÈRE, J.; FERRARI-ILIOU, R. **Intracellular antioxidants: from chemical to biochemical mechanisms**. Food and Chemical Toxicology, v. 37, p. 949-962, 1999.
- CHEN, C.T.; CHEN, L.M.; LIN, C.C.; KAO, C.H. **Regulation of proline accumulation in detached rice leaves exposed to excess copper**. Plant Science, v. 160, p. 283-290, 2001.
- COOLEY, W.E.; FOY, C.L. **Effects of SC-0224 and glyphosate on free amino acids, soluble protein, and protein synthesis in inflated duckweed (*Lemna gibba*)**. Weed Science, v. 40, p. 345-350, 1992.
- DEVINE, M.; DUKE, S.O.; FEDTKE, C. **Physiology of herbicide action**. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993. 441p.
- DRÖGE, W. **Free radicals in the physiological control of cell function**. Physiological Reviews, v. 82, p. 47-95, 2002.
- DUBEY, R.S. **Metal toxicity, oxidative stress and antioxidative defense system in plants**. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2011. p. 178-203.
- DUGGLEBY, R.G.; PANG, S.S. **Acetohydroxyacid synthase**. Journal of Biochemistry and Molecular Biology, v. 33, p. 1-36, 2000.
- DYER, W.E.; WELLER, S.C. **Plant response to herbicide**. In: JENKS, M.A.; HASEGAWA, P.M. Plant abiotic stress. Oxford: Blackwell Publishing, p 171-214. 2005.
- EDWARDS, R.; DIXON, D. P.; WALBOT, V. **Plant glutathione S-transferases: enzymes with multiple functions sickness and in health**. Trends in Plant Science, v. 5, p. 193-198, 2000.
- EKMEKCI, Y.; TERZIOGLU, S. **Effects of oxidative stress induced by paraquat on wild and cultivated wheats**. Pesticide Biochemistry and Physiology, v. 83, p. 69-81, 2005.
- FEDTKE, C. **Biochemistry and physiology of herbicide action**. Springer-Verlag: New York, 202 pp., 1982.
- FOREMAN, J.; DEMIDCHIK, V.; BOTHWELL, J.H.; MYLONA, P.; MIEDEMA, H.; TORRES, M.A.; LINSTAD, P.; COSTA, S.; BROWNLEE, C.; JONES, J.D.; DAVIES, J.M.; DOLAN, J. **Reactive oxygen species produced by NADPH oxidase regulate plant cell growth**. Nature, v. 422, p. 442-446, 2003.
- FOYER, C.H.; BLOOM, A.J.; QUEVAL, G.; NOCTOR, G. **Photorespiratory metabolism: genes, mutants, energetics, and redox signaling**. Annual Review of Plant Biology, v. 60, p. 455-84, 2009.
- FOYER, C.H.; SHIGEOKA, S. **Understanding oxidative stress and antioxidant functions to enhance photosynthesis**. Plant Physiology, v. 155, p. 93-100, 2011.

FUFEZAN, C.; RUTHERFORD, A.W.; KRIEGER-LISZKAY, A. **Singlet oxygen production in herbicide-treated photosystem II**. FEBS Letters, v. 532, p. 407-410, 2002.

GADJEV, I.; STONE, J.M.; GECHEV, T.S. **Programmed cell death in plants: new insights into redox regulation and the role of hydrogen peroxide**. International Review of Cell and Molecular Biology, v. 270, p. 87-144, 2008.

GILL, S.S.; TUTEJA, N. **Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants**. Plant Physiology and Biochemistry, v. 48, p. 909-930, 2010.

BHATTACHARJEE, S. **Sites of generation and physicochemical basis of formation of reactive oxygen species in plant cell**. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2010. p.1-30.

GODDARD, R.H.; WICK, S.M.; SILFLOW, C.D.; SNUSTAD, P.D. **Microtubule components of the plant cell cytoskeleton**. Plant Physiology, v. 104, p. 1-6, 1994.

GONÇALVES, E. R. **Fotossíntese, osmorregulação e crescimento inicial de quarto variedades de cana-de-açúcar submetida à deficiência hídrica**. 2008. 66 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) - Universidade Federal do Alagoas, Rio Largo.

GRATÃO, P.L.; POLLE, A.; LEA, P.J.; AZEVEDO, R.A. **Making the life of heavy metal stressed plants a little easier**. Functional Plant Biology, v. 32, p. 481-494, 2005.

HAN, O.; KIM, O.; KIM, C.; PARK, R.D.; GUH, J.O. **Role of autoxidation of protoporphyrinogen IX in the action mechanism of diphenyl ether herbicides**. Bulletin of the Korean Chemical Society, v. 16, p. 1013-1-14, 1995.

HAVAUX, M.; NIYOGI, K.K. **The violaxanthin cycle protects plants from photooxidative damage by more than one mechanism**. Proceedings of the National Academy of Science USA, v. 96, p. 8762-8767, 1999.

HELDT, H. **Plant biochemistry and molecular biology**. New York: Oxford University Press, 1997. 522 p.

JACOBS, J.M.; JACOBS, N.J. **Porphyrin accumulation and export by isolated barley (*Hordeum vulgare*) plastids**. Plant Physiology, v. 101, p. 1181-1187, 1993.

KOVALCHUK, I. Multiple roles of radicals in plants. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2010. p.31-44.

KRINSKY, N.I. **Antioxidant function of carotenoids**. Free Radical Biology and Medicine, v. 7, p. 617-35, 1989.

KWAK, S.S.; KIM, S.K.; PARK, I.H.; LIU, J.R. **Enhancement of peroxidase activity by stress related chemicals in sweet potato**. Phytochemistry, v. 43, p. 565-568, 1996.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: RiMa, 2000. 531p.

LAROSSA, R.A.; SCHLOSS, J.V. **The sulfonyl urea herbicide sulfometuron-methyl is an extremely potent and selective inhibitor of acetolactate synthase (EC 4.1.3.18) in *Salmonella typhimurium***. Journal of Biological Chemistry, v. 259, p. 8753-8757, 1984.

LIMA, G.P.P.; BRASIL, O.G.; OLIVEIRA, A.M. **Poliaminas e atividade da peroxidase em feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado sob estresse salino**. Scientia Agricola, v. 56, p. 21-25, 1999.

- LOCATO, V.; PINTO, M.C.; PARADISO, A.; DE GARA, L. **Reactive oxygen species and ascorbate-glutathione interplay in signaling and stress responses**. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2010. p.45-64.
- MA, N.L.; RAHMAT, Z.; LAM, S.S. **A review of the “omics” approach to biomarkers of oxidative stress in *Oryza sativa***. International Journal of Molecular Sciences, v. 14, p. 7515-7541, 2013.
- MATYSIK, J.; ALIA, B.; BHALU, B.; MOHANTY, P. **Molecular mechanisms of quenching of reactive oxygen species by praline under stress in plants**. Current Science, v. 82, p. 525-532, 2002.
- MILLER, G.; SUZUKI, N.; CIFTCI-YILMAZ, S.; MITTLER, R. **Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses**. Plant, Cell & Environment, v. 33, p. 453-467, 2011.
- MITTLER, R. **Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance**. Plant Science, v. 7, p. 405-410, 2002.
- MITTLER, R.; VANDERAUWERA, S.; GOLLERY, M.; VAN BREUSEGEM, F. **Reactive oxygen gene network of plants**. Trends in Plant Science, v. 9, p. 490-498, 2004.
- MYLONA, P.V.; POLIDOROS, A.N. **ROS regulation of antioxidant genes**. In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2011. p.101-128.
- NOCTOR, G.; FOYER, C.H. **A re-evaluation of the ATP: NADPH budget during C3 photosynthesis. A contribution from nitrate assimilation and its associated respiratory activity?** Journal of Experimental Botany, v. 49, p. 1895-1908, 1998.
- PANDHAIR, V.; SEKHON, B.S. **Reactive oxygen species and antioxidants in plants: an overview**. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, v. 15, p. 71-78, 2006.
- PENG, C.L.; OU, Z.Y.; LIU, N.; LIN, G.Z. **Response to high temperature in flag leaves of super high-yielding rice Pei'ai 64S/E32 and Liangyoupeijiu**. Rice Science, v. 12, p. 179-186, 2005.
- SANDMANN, G.; BÖGER, P. **Herbicides affecting plant pigment**. Proceedings of the British Crop Protection Conference – Weeds. BCPC Publications, Hampshire, UK, p. 139-148, 1987.
- SASAKI, Y.; NAGANO, Y. **Plant acetyl-CoA carboxylase: structure, biosynthesis, regulation, and gene manipulation for plant breeding**. Bioscience, Biotechnology and Biochemistry, v. 68, p. 1175-1184, 2004.
- SERKEDJIEVA, J. **Antioxidant effects of plant polyphenols: a case study of a polyphenol-rich extract from *Geranium sanguineum* L.** In: GUPTA, S.D. Reactive oxygen species and antioxidants in higher plants. Enfield: Science Publishers, 2011. p. 275-293.
- SHARMA, P.; JHA, A.B.; DUBEY, R.S.; PESSARAKLI, M. **Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stress ful conditions**. Journal of Botany, v. 2012, p. 1-26, 2012.
- SHERMAN, T.D.; VAUGHN, K.C.; DUKE, S.O. **Mechanisms of action and resistance to herbicides**. In: DUKE, S.O. (ed.). Herbicide-resistant crops: agricultural, environmental, economic, regulatory, and technical aspects. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 13-36, 1996.
- SIEGEL, B.Z. **Plant peroxidases: an organism perspective**. Plant Growth Regulation, v. 12, p. 303-312, 1993.

SIGNORELLI, S.; COITIN, O.E.L.; BORSANI, O.; MONZA, J. **Molecular mechanisms for the reaction between OH radicals and proline: insights on the role as reactive oxygen species scavenger in plant stress.** The Journal of Physical Chemistry B, v. 118, p. 37-47, 2014.

SUNTRES, Z.E. **Role of antioxidants in paraquat toxicity.** Toxicology, v. 180, p. 65- 77, 2002.

SYROS, T.; YUPSANIS, T.; ZAFIRIADIS, H.; ECONOMOU, A. **Activity and isoforms of peroxidases, lignin and anatomy, during adventitious rooting in cuttings of *Ebenus cretica* L.** Journal of Plant Physiology, v. 161, p. 69–77, 2004.

TRENKAMP, S.; MARTIN, W.; TIETJEN, K. **Specific and differential inhibition of very-long-chain fatty acid elongases from *Arabidopsis thaliana* by different herbicides.** Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America, v. 101, p. 11903-11908, 2004.

UCHIDA, A.; JAGENDORF, A.T.; HIBINO, T.; TAKABE, T.; TAKABE, T. **Effect of hydrogen peroxide and nitric oxide on both salt and heat stress tolerance in rice.** Plant Science, v. 163, p. 515–523, 2002.

WAKABAYASHI, K.; BÖGER, P. **Phytotoxic sites of action for molecular design of modern herbicides (Part 1): the photosynthetic electron transport system.** Weed Biology and Management, v. 4, p. 8-18, 2004.

RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS A HERBICIDAS

Ana Claudia Langaro

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Gabriella Francisco Pereira Borges de Oliveira

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Jéssica Ferreira Lourenço Leal

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

José Maurício Fajardo da Cunha

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Luana Jéssica da Silva Ferreira

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Juliana Lima Diniz

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Camila Ferreira de Pinho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

RESUMO: O controle químico tornou-se indispensável como ferramenta no manejo de plantas daninhas, pois possibilita o controle em extensas áreas de produção, é altamente eficiente e econômico. No entanto, a utilização repetida de herbicidas pertencentes ao mesmo mecanismo de ação aumenta a pressão de seleção levando ao surgimento de biótipos de plantas daninhas resistentes. As plantas daninhas podem sobreviver a aplicação de herbicidas devido a um ou mais mecanismos de resistência. Esses mecanismos podem ou não estar relacionados ao local de ação do herbicida. Os mecanismos relacionados ao local de ação envolvem alterações no sítio alvo como mutação e modificações na expressão gênica. Por outro lado, redução na absorção e translocação, metabolização, compartimentalização e sequestro no vacúolo são mecanismo de resistência não relacionados ao sítio alvo. A resistência de plantas daninhas é um processo evolutivo e pode ser influenciada por diversos fatores, sendo eles: genéticos, relacionados a biologia das plantas, relacionados aos herbicidas e ainda operacionais. O diagnóstico precoce e a confirmação da resistência são imprescindíveis para o sucesso do manejo de plantas daninhas resistentes. Além disso, estratégias que visam evitar a seleção de novos biótipos resistentes devem fazer parte do programa de manejo nas áreas de produção.

PALAVRAS-CHAVE: controle de plantas daninhas; biótipos resistentes; pressão de seleção.

ABSTRACT: Chemical control has become indispensable as a tool in the management of weeds, since it allows the control in extensive production areas, it is highly efficient and economical. However, the repeated use of herbicides belonging to the same mechanism of action increases the selection pressure leading to the emergence of a resistant weed biotype. Weeds can survive the application of herbicides due to one or more resistance mechanisms. These mechanisms may or may not be related to the site of action of the herbicide. Mechanisms related to the site of action involve changes in the target site such as mutation and modifications in gene expression. On the other hand, reduction in absorption and translocation, metabolization, compartmentalization and sequestration in the vacuole are resistance mechanisms not related to the target site. The resistance of weeds is an evolutionary process and can be influenced by several factors, being: genetic, related to plant biology, related to herbicides and still operational. Early diagnosis and confirmation of resistance is essential for successful weed management. In addition, strategies aimed at avoiding the selection of new resistant biotypes should be part of the management program in the production areas.

KEYWORDS: weed control; resistant biotypes; selection pressure.

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo, devido à sua extensa terra arável e clima favorável para a produção. No entanto, as plantas daninhas causam graves perdas devido à competição com a cultura de interesse por recursos essenciais (SWANTON et al., 2015; GHARDE et al., 2018).

Os métodos normalmente utilizados para controlar as plantas daninhas são o mecânico, o físico, o biológico, o químico e o cultural, sendo o químico o mais empregado. O controle químico tornou-se indispensável como ferramenta no manejo de plantas daninhas, pois possibilita o controle em extensas áreas de produção, é altamente eficiente, possui baixo custo, permite o controle de plantas daninhas perenes bem como aquelas que ocorrem na linha do plantio (BUENO et al., 2013). Além disso, a maioria das moléculas químicas registradas para uso como herbicida são seletivas, ou seja, permitem o controle de plantas indesejáveis sem ocasionar danos à cultura de interesse econômico. Diversos são os herbicidas registrados para uso agrícola, no entanto, é comum a utilização de uma única molécula de forma consecutiva nas áreas de produção. Essa prática compromete o sistema, pois o uso repetido de um mesmo mecanismo de ação por anos consecutivos pode levar a seleção de biótipos de plantas daninhas resistentes (POWLES & YU, 2010; DÉLYE et al.; 2013).

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é comumente confundida com o conceito de tolerância. No entanto, faz-se necessário a distinção entre os termos,

visto que são características diferentes do ponto de vista evolutivo. Dessa forma, a resistência pode ser conceituada como a capacidade adquirida de uma planta em sobreviver e multiplicar após ser exposta determinada dose de um herbicida que, em condições normais, controla os demais integrantes da população (WSSA, 1998). A resistência pode ocorrer naturalmente (seleção natural) ou ser induzida com o uso de biotecnologia, podendo ainda ser classificada em cruzada ou múltipla. A resistência cruzada ocorre quando um biótipo é resistente a dois ou mais grupos químicos diferentes pertencentes ao mesmo mecanismo de ação. No entanto, quando um biótipo possui a capacidade de sobreviver a dois ou mais herbicidas, de diferentes mecanismos de ação, a resistência é do tipo múltipla.

Por outro lado, a tolerância pode ser definida como a característica inata de algumas espécies em sobreviver e se reproduzir após o tratamento com herbicida, mesmo sofrendo injúrias. É uma característica da espécie e nesse caso, não são encontrados biótipos sensíveis dentro da população (CHRISTOFFOLETI, 2008). Exemplos de plantas tolerantes ao glifosato são trapoeraba, poaia-branca, corda-de-viola, entre outras. Essas espécies nunca foram controladas eficientemente por esse herbicida, desde a época do seu lançamento comercial. Essas características relacionam-se com a variabilidade genética natural da espécie. Em contrapartida, biótipos resistentes eram eficientemente controlados pelos herbicidas, mas como o passar do tempo, devido a questões evolutivas, passaram a não ser mais controlados devido a diversos mecanismos que impedem o herbicida de alcançar o local de ação ou ainda a fatores relacionados a sua metabolização.

A resistência de planta daninhas onera ainda mais o custo de produção. Estima-se que, em lavouras de soja com plantas daninhas resistentes ao glifosato, os custos podem subir, em média, de 42% a 222%, principalmente pelo aumento de gastos com herbicidas e pela perda de produtividade da soja. Em áreas com infestações isoladas de buva e de azevém os valores sobem, em média, entre 42% e 48% respectivamente, e até 165% se houver capim-amargoso resistente. O cenário é ainda pior em casos de infestações de buva e capim-amargoso na mesma área de produção, com aumento médio de 222% (ADEGAS et al., 2017).

2 | MECANISMOS DE RESISTÊNCIA

As plantas daninhas podem sobreviver a aplicação de herbicidas devido a um ou mais mecanismos de resistência. Esses mecanismos podem ou não estar relacionados ao local de ação do herbicida. Os mecanismos ligados ao local de ação são denominados TSR (do inglês Target Site Resistance) enquanto os não relacionados ao local de ação são chamados de NTSR (do inglês Non-Target Site Resistance). Dentre os mecanismos TSR, podemos citar a alteração no local de ação, a qual pode ser conferida por mutações no código genético ou pela superexpressão da enzima alvo.

Por outro lado, a redução na absorção e translocação do herbicida, metabolização, compartimentalização, sequestro no vacúolo, resposta rápida a necrose e recuperação de efeito fitotóxico são mecanismos do tipo NTSR.

Mutações são alterações no código genético que ocorrem espontaneamente a todo tempo na natureza. Algumas mutações são deletérias, comprometendo a sobrevivência dos organismos. No entanto, a maioria delas podem ser do tipo silenciosas ou que não provocam a morte dos indivíduos, sendo repassadas para próxima geração. Biótipos resistentes podem ocorrer em uma população de plantas daninhas como resultado de mutações que provocam alterações no local de ação do herbicida. Para que ocorra mutação é necessária a alteração de bases nitrogenadas ao longo da cadeia de DNA. Essas alterações podem ser devido a deleção, inserção ou substituição de uma ou mais bases nitrogenadas. Quando a base nitrogenada mutada faz parte de um aminoácido presente na composição da enzima alvo do herbicida ocorrem alterações na conformação dessa enzima, impedindo que o herbicida se ligue eficientemente e efetue seu papel (WANG et al., 2009; DAYAN et al., 2010; YU et al., 2010).

Evidências sugerem que o número de cópias dos genes que codificam as enzimas alvo dos herbicidas também tem efeito na evolução da resistência. Se a proteína alvo no qual o herbicida se liga for produzida em grande quantidade, o efeito do herbicida pode se tornar insignificante. Por exemplo, em um indivíduo poliplóide, uma simples mutação em um dos homólogos que codificam a enzima alvo, tende a conferir menor nível de resistência quando comparada a indivíduos diplóides com a mesma mutação (YU et al., 2013). Esse mecanismo já foi identificado e associado, por exemplo, com a resistência de plantas daninhas ao glifosato, para o qual um maior número de cópias do gene que codifica a EPSPS foi observado (SAMMONS & GAINES, 2014). Além disso, a superexpressão da acetil-CoA carboxilase (ACCase) confere resistência em *Digitaria sanguinalis* ao herbicida fluazifop-P-butyl (LAFORREST et al., 2017).

Atualmente, o NTSR é considerado o tipo predominante de resistência ao glifosato e aos inibidores da ACCase. O NTSR é também o tipo predominante de resistência aos inibidores da acetolactato sintase (ALS) em gramíneas (POWLES & YU, 2010; BECKIE & TARDIF, 2012; SHANER et al., 2012; DÉLYE, 2013). O aspecto negativo do NTSR é que a resistência múltipla associada a esse mecanismo permanece imprevisível já que não é específica para o modo de ação do herbicida.

O NTSR é um subconjunto de respostas de plantas a estresses abióticos (DÉLYE, 2013; YUAN et al., 2007), podendo ser constitutivo, induzido por estresse, ou ambos (CUMMINS et al., 2009). Quando se fala em NTSR constitutivo, há evidências que esse pode estar associado ao metabolismo secundário em plantas (CUMMINS et al., 2009). Por outro lado, a hipótese atual para NTSR induzido é que a aplicação de herbicida é um estresse que desencadeia vias de resposta em todos os indivíduos, independentemente de sua sensibilidade ao herbicida (DÉLYE, 2013).

Dentre os mecanismos NTSR, um dos mais importantes e de ampla ocorrência

é a redução na absorção e translocação. Dessa forma, a quantidade de herbicida que atinge o local de ação é bastante reduzida, não chegando a ser suficiente para controlar a planta. Para detectar a quantidade de herbicida que é absorvido e translocado na planta, utiliza-se a técnica de radioisótopos, com herbicida marcado com ^{14}C . Dessa forma é possível saber quanto do total inicial aplicado foi absorvido pelas plantas e identificar para quais segmentos da planta o mesmo está sendo translocado.

A seletividade de herbicidas sobre plantas cultivadas muitas vezes é dada pela capacidade dessas de metabolizar a molécula e inativá-la de forma que seu crescimento e desenvolvimento não sejam comprometidos. Essa característica é comum de ser observada nas plantas cultivadas, mas pode também ser considerada um mecanismo de resistência quando presente em biótipos de plantas daninhas. Neste caso, a planta resistente possui a capacidade de decompor mais rapidamente do que plantas sensíveis, a molécula herbicida, tornando-a não-tóxica. Estudos mostram que a resistência causada por mecanismos não relacionados ao local de ação, principalmente causada pelo incremento de metabolização, é altamente problemática devido à ocorrência de biótipos com resistência múltipla, sendo um novo desafio para o manejo de plantas daninhas e utilização de herbicidas. As principais enzimas envolvidas nesse processo são citocromo P450 monooxigenases (CytP450) e glutationa S-transferase (GST) (POWLES & YU, 2010).

Como forma de reduzir a quantidade de herbicida que chega ao local de ação, o sequestro no vacúolo também tem sido sugerido como um mecanismo de resistência em plantas resistentes ao paraquat (CONTE & LLOYD, 2011), sendo também documentado recentemente que os transportadores ABC poderiam atuar no sequestro do glifosato em vacúolos tornando-o não tóxico para as plantas e podendo assim conferir resistência a esse herbicida (GE et al., 2010). Os transportadores ABC abrangem proteínas transmembranas, que utilizam a energia resultante da hidrólise de ATP, para transportar uma variedade de moléculas através de membranas biológicas. Essas proteínas desempenham um papel importante não só no transporte de hormônios, lipídeos, metais, metabolitos secundários e xenobióticos, mas também contribuem nas interações planta-patógeno, modulação de canais de íons e bombeamento das moléculas, tais como xenobióticos e outros compostos tóxicos, para fora das células (KANG et al., 2011). Para apoiar a associação dos transportadores ABC com resistência a herbicidas, Peng et al. (2010) relataram que a exposição de biótipo resistentes de *Conyza* spp. ao glifosato levou à regulação de vários genes envolvidos na transcrição de transportadores ABC.

3 | EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA

As plantas daninhas, apresentam ampla variabilidade genética, o que permite a sobrevivência em uma diversidade de condições ambientais. Qualquer população,

cujos indivíduos possuem uma base genética variável quanto à tolerância a uma medida de controle, irá, com o passar do tempo, mudar sua composição populacional como mecanismo de fuga para sobrevivência (CHRISTOFFOLETI, 2008). A resistência a herbicidas é amplamente conhecida como resultado da evolução de populações de plantas daninhas a intensa pressão de seleção exercida pelos herbicidas (NEVE et al., 2009).

Quando se toma por base uma população de plantas, sabe-se que independentemente da aplicação ou não de herbicidas, estão contidos nessa população biótipos que possuem característica de resistência (KISSMANN, 1996). A resistência pode ser conferida por dois processos: mutação e ou seleção natural baseada em genes pré-existentes (CHRISTOFFOLETI, 2008). As mutações ocorrem ao acaso e são pouco frequentes. Não existem evidências até hoje de que os herbicidas possam ser a causa das mutações, visto que no processo de desenvolvimento e registro dos produtos é preciso comprovar que os mesmos não possuem capacidade mutagênica. Já a seleção natural é amplamente aceita como explicação para esse processo evolutivo. Dessa forma, biótipos resistentes sempre estão presentes em baixa frequência no ambiente, podendo ser selecionados por meio do uso contínuo de herbicidas. Quando o herbicida é aplicado, ocorre aumento na pressão de seleção, sendo que os biótipos suscetíveis são controlados, enquanto os resistentes sobrevivem e se reproduzem na ausência de competição (CHRISTOFFOLETI, 2008).

4 | FATORES QUE AFETAM A EVOLUÇÃO

Diversos são os fatores que contribuem para seleção e evolução da resistência a herbicidas e têm sido agrupados em fatores relacionados a genética, biologia das plantas daninhas, aos herbicidas e operacionais (Figura 1).

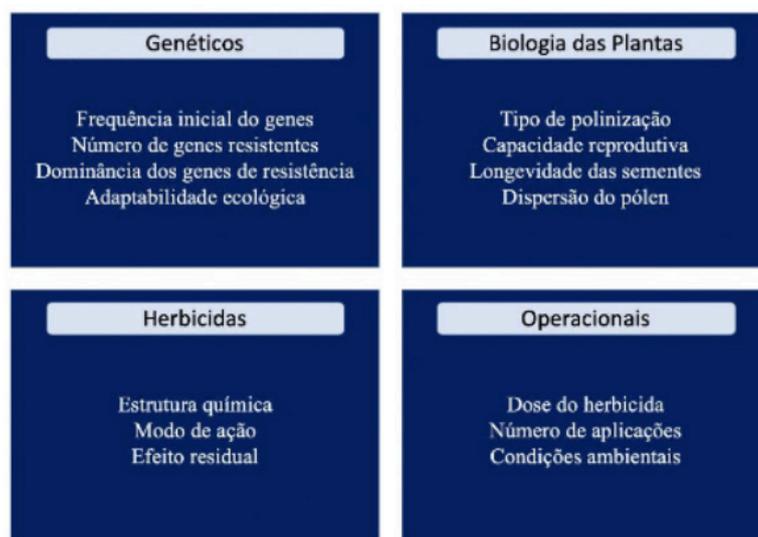


Figura 1. Fatores que influenciam na evolução da resistência a herbicidas em populações de plantas daninhas. Adaptado de POWLES & YU, 2010.

Dentre os fatores genéticos que influenciam na evolução da resistência a herbicidas, podemos citar a frequência inicial do alelo de resistência, o grau de dominância dos genes resistente e ainda a adaptabilidade ecológica. Sabe-se que a frequência inicial varia de acordo com a população e o mecanismo de ação do herbicida. A frequência inicial do genoma herdado com relação à resistência às triazinas em populações não selecionadas está entre 10^{-10} e 10^{-20} plantas por hectare (GRESSEL, 1991), enquanto que a frequência inicial mais alta, de 10^6 plantas por hectare, ocorre nos biótipos resistentes aos herbicidas inibidores da enzima ALS (STANNARD & FAY, 1987).

O tipo de polinização, capacidade de produção de sementes, a longevidade das sementes no banco dos propágulos do solo, bem como a capacidade de dispersão do grão de pólen também são fatores que possuem influência no processo evolutivo. Populações formadas por espécies alógamas, com elevada capacidade de deixar descendentes e que apresentam dormência como característica das sementes produzidas possuem maiores chances de apresentar em sua composição biótipos resistentes.

Algumas características relacionadas aos herbicidas alteram a pressão de seleção sobre as populações de plantas daninhas. A pressão de seleção depende da estrutura química do herbicida, sendo que herbicidas que possuem como mecanismo de ação a inibição de uma única enzima envolvida na rota de biossíntese possuem maior capacidade de selecionar biótipos resistentes. Além disso, herbicidas altamente efetivos ou que possuem efeito residual exercem maior pressão de seleção sobre as plantas, visto que permanecem exercendo a função de controle sobre sementes do solo mesmo após dias ou semanas da sua aplicação.

Por último, pode-se citar os fatores operacionais, ou ainda ligados à atividade antrópica. Esse grupo é o único que o ser humano possui controle e capacidade de alterar como forma de evitar ou retardar o surgimento da resistência. Estão inclusos nesse grupo de fatores a dose do herbicida utilizada, o número de aplicações, a repetitividade do mesmo mecanismo de ação, o sistema de monocultivo, entre outras práticas de manejo.

5 | SITUAÇÃO ATUAL NO BRASIL E NO MUNDO

O primeiro caso de resistência a herbicidas reportado ocorreu em 1957, quando biótipos de *Daucus carota*, no Canadá, e *Commelina diffusa*, nos Estados Unidos, passaram a não ser efetivamente controlados pelo 2,4-D (HILTON, 1957). Atualmente, já foram reportados 498 casos de resistência a herbicidas, incluindo 255 espécies, sendo 148 monocotiledôneas e 107 eudicotiledoneas. Esse número vem crescendo rapidamente nos últimos anos, sendo observado aumento de 107% em relação ao ano de 2010 (Figura 2) (HEAP, 2019). Já foram reportados casos de resistência a maioria

dos mecanismos de ação conhecidos e isso torna-se um problema devido ao fato de que nenhum mecanismo de ação novo tem sido relatado desde 1991 (DUKE, 2012).

No Brasil, os primeiros casos foram reportados em 1992, quando biótipos de *Euphorbia heterophylla* e *Bidens pilosa* foram identificados como resistentes aos inibidores da ALS. Atualmente, foram registrados 50 casos de biótipos resistentes, sendo a maioria deles resistentes aos inibidores da ALS (29 casos) e aos inibidores da EPSPs (15 casos). Um fato preocupante é que dos 50 casos relatados, 16 apresentam resistência múltipla a dois ou mais mecanismos de ação (HEAP, 2019).

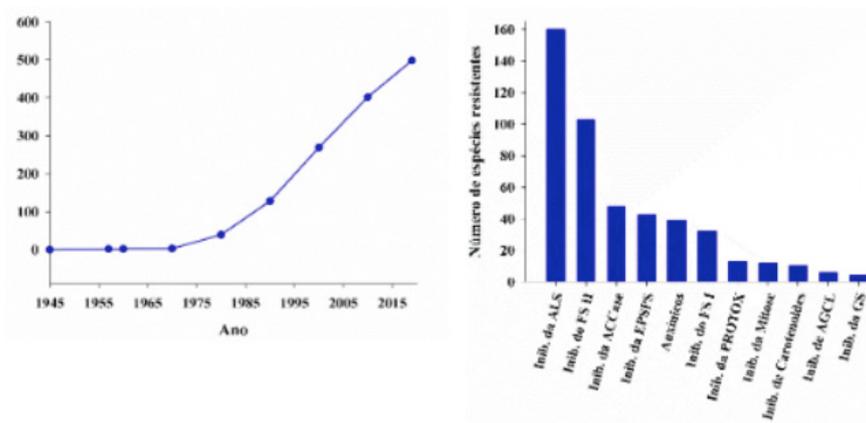


Figura 2. Número de biótipos de plantas daninhas resistentes a herbicidas reportados ao longo dos anos. Fonte: HEAP, 2019.

6 | *Conyza sumatrensis*: UM NOVO CASO DE RESISTÊNCIA NO BRASIL

No Brasil, o primeiro relato de *Conyza* spp resistente ao glifosato foi no Rio Grande do Sul em 2005 (LAMEGO & VIDAL, 2008). Após a resistência de buva ao glifosato, o uso de herbicidas inibidores da ALS (inibidor acetolactato sintase) passou a ser empregados amplamente para controle dessa espécie em soja. Como resultado da alta pressão de seleção exercida pelos herbicidas inibidores da ALS, em 2011, foram identificados biótipos de buva com resistência múltipla ao glifosato e aos inibidores da ALS (SANTOS et al., 2014). O caso se agravou em 2016 e 2017, onde foi registrado resistência da buva ao herbicida paraquat (inibidor do fotossistema I - FSI) e saflufenacil (inibidor da protoporfirinogênio oxidase - Protox) e resistência múltipla aos herbicidas clorimuram (ALS), glifosato (EPSPs) e paraquat (FSI). O último caso alarmante foi diagnosticado pelo grupo de pesquisa Plantas Daninhas e Pesticidas no Ambiente-UFRRJ, onde se detectou um biótipo de buva com resistência a cinco mecanismo de ação: FSI, Protox, FSII (fotossistema II), Mimetizador de auxina e EPSPs (HEAP, 2019).

Atualmente no Brasil a buva é uma das principais plantas daninhas nos sistemas produtivos, podendo reduzir a produtividade da soja em até 48% dependendo da densidade por metro quadrado (GAZZIERO et al., 2010; BLAINSKI et al., 2015). Para

Trezzi (2015) plantas de *Conyza bonariensis* podem reduzir o rendimento de soja em 36%, 12% e 1,0%, quando estabelecidas em 81, 38 e 0 dias antes da semeadura da soja, respectivamente.

7 | DIAGNÓSTICO E CONFIRMAÇÃO DA RESISTÊNCIA

Como a resistência de plantas daninhas é um processo evolutivo, é possível que nos primeiros anos não seja possível diagnosticá-la. Estima-se que o fenômeno se torna perceptível quando 20% da população de plantas possui a característica de resistência (KISSMANN, 1996).

A ineficiência no controle de plantas daninhas não implica necessariamente em resistência. O mesmo pode ser resultado do emprego de técnicas de controle inadequadas. Dessa forma, para diagnosticar a resistência alguns passos devem ser levados em conta (Figura 3).

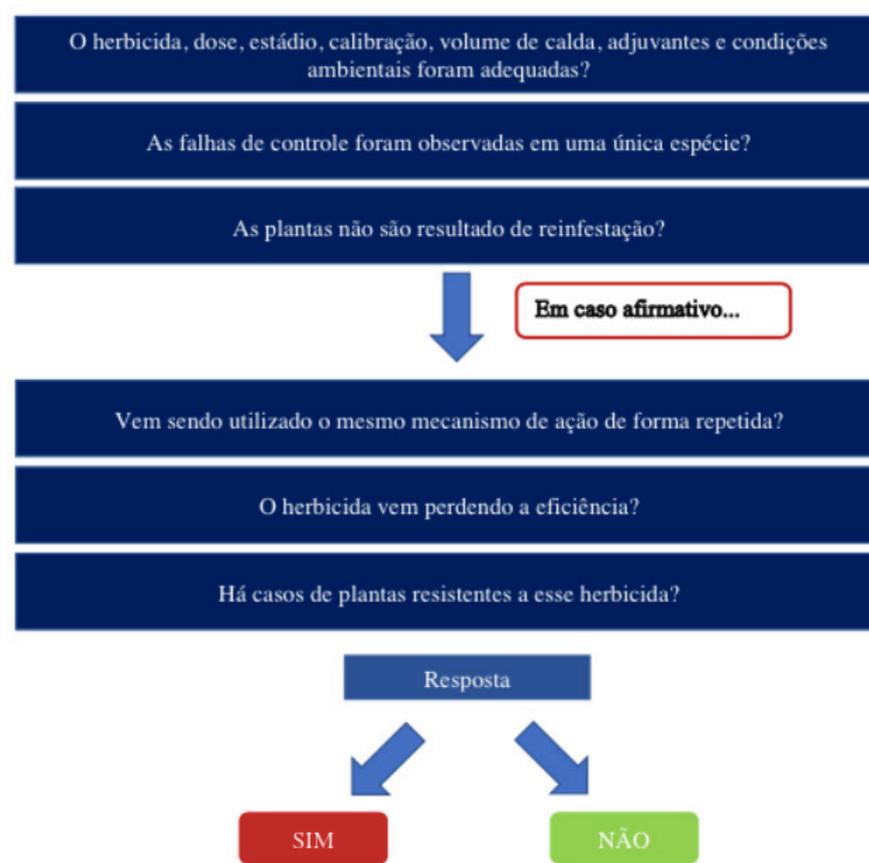


Figura 3. Fluxograma indicando os primeiros passos para diagnóstico de novos casos de resistência a herbicidas. Adaptado de HRAC, 1998.

O fluxograma acima representa uma série de questionamentos que devem ser feitos para iniciar o diagnóstico da resistência. Se ao final dos questionamentos as respostas forem afirmativas é possível que esteja ocorrendo a seleção de biótipos resistentes. Em caso de resposta negativas, as causas do insucesso no controle devem ser investigadas. Após diagnosticada a resistência, a mesma deve ser confirmada. Para isso, é necessário seguir alguns critérios pré-estabelecidos.

A confirmação científica da resistência de plantas daninhas a herbicidas pode ser realizada por meio de ensaios de campo, casa de vegetação e laboratório. O método mais comum se dá por meio da condução de curvas de dose-reposta. Através da curva de dose-resposta é determinado o C_{50} , ou seja, a dose necessária para controlar 50% da população. Baseado na curva de dose-resposta é possível também determinar o GR_{50} , o qual determina a dose necessária para reduzir em 50% o acúmulo de biomassa das plantas. Este índice é usado para calcular o fator de resistência. Para isso, divide-se o valor de C_{50} ou GR_{50} do biótipo resistente pelo suscetível.

O uso da regressão não linear descrito por Streibig et al. (1993) é o método mais adequado para elaboração da curva de dose-resposta. Uma adaptação desse modelo foi proposta por Seefeldt et al. (1995) e é utilizada até hoje. Os autores sugerem que esse modelo apresenta inúmeras vantagens em relação aos demais, como por exemplo, a estimativa do parâmetro C_{50} ou GR_{50} pela própria equação, facilitando a comparação entre os biótipos em estudo.

8 | MEDIDAS PARA EVITAR A SELEÇÃO DE BIÓTIPOS RESISTENTES

O diagnóstico precoce da resistência e a adoção de medidas preventivas que visam evitar a seleção de novos biótipos resistentes são medidas essenciais que devem estar contidas em um programa de manejo. O objetivo geral consiste em reduzir a pressão de seleção sobre a população de plantas daninhas e controlar os indivíduos resistentes antes que os mesmos produzam sementes.

Dentre as medidas que devem ser adotadas para evitar a resistência, podemos citar:

1. Utilização de herbicidas com diferentes mecanismos de ação;
2. Realizar aplicações em mistura ou sequencial;
3. Rotação de mecanismo de ação;
4. Rotação de culturas;
5. Utilizar cobertura de inverno;
6. Rotação de métodos de controle;
7. Utilizar sementes certificadas;
8. Evitar que indivíduos resistentes produzam sementes.

REFERÊNCIAS

ADEGAS, F. S.; VARGAS, L.; GAZZIERO, D. L. P.; KARAM, D.; SILVA, A.F.; AGOSTINETTO, D. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil**. Londrina: Embrapa Soja, 2017 (Circular Técnica).

AVILA-GARCIA, W. V.; SANCHEZ-OLGUIN, E.; HULTING, A. G.; MALLORY-SMITH, C. **Target-site mutation associated with glufosinate resistance in Italian ryegrass (*Lolium perenne* L. ssp. *multiflorum*)**. Pest Management Science, v. 68, n. 9, p. 1248–1254, 2012.

BECKIE, H.; TARDIF, F.J. **Herbicide cross resistance in weeds**. Crop Protection, v. 35, p. 15–28, 2012.

BLAINSKI, É.; MACIEL, C.; ZOBIOLE, L.; RUBIN, R.; SILVA, A.; KARPINSKI, R.; HELVIG, E. **Eficiência do cloransulam-metílico no controle em pós-emergência de *Conyza bonariensis* na cultura da soja RR®**. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 14, n. 3, p. 235-242, 2015.

BUENO, M. R.; ALVES, G. S.; PAULA, A. D. M.; CUNHA, J. P. A. R. **Volume de calda e adjuvantes no controle de plantas daninhas com glyphosate**. Planta Daninha, v. 31, n. 3, p. 705-713, 2013.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; LÓPEZ-OVEJERO, R. F. **Resistência das plantas daninhas a herbicidas: definições, bases e situação no Brasil e no mundo**. In: CHRISTOFFOLETI, P. J. (Coord.). Aspectos de resistência de plantas daninhas a herbicidas. 3.ed. Piracicaba: Associação Brasileira de Ação à Resistência de Plantas aos Herbicidas - HRAC-BR, 2008, p. 9–34.

CONTE, S.S.; LLOYD, A.M. **Exploring multiple drug and herbicide resistance in plants—spotlight on transporter proteins**. Plant Science, v. 180, n. 2, p. 196–203, 2011.

CUMMINS, I.; BRYANT, D. N.; EDWARDS, R. **Safener responsiveness and multiple herbicide resistance in the weed black-grass (*Alopecurus myosuroides*)**. Plant Biotechnology, v. 7, n. 8, p. 807–820, 2009.

DAYAN, F. E.; DAGA, P. R.; DUKE, S. O.; LEE, R. M.; TRANEL, P. J.; DOERKSEN, R. J. **Biochemical and structural consequences of a glycine deletion in the α -8 helix of protoporphyrinogen oxidase**. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics, v. 1804, n. 7, p. 1548–1556, 2010.

DÉLYE, C. **Unravelling the genetic bases of non-target-site based resistance (NTSR) to herbicides: a major challenge for weed science in the forthcoming decade**. Pest Management Science, v. 69, n. 2, p. 176–187, 2013.

DÉLYE, C.; JASIENIUK, M.; LECORRE, V. **Deciphering the evolution of herbicide resistance in weeds**. Trends Genet, v. 29, p. 649–658, 2013.

DUKE, S. O. **Why have no new herbicide modes of action appeared in recent years?** Pest Management Science, v. 68, p. 505–512, 2012.

GAZZIERO, D. L. P.; ADEGAS, F. S.; VOLL, E.; VARGAS, L.; KARAM, D.; MATALLO, M. B.; CERDEIRA, A. L.; FORNAROLI, D. A.; OSIPE, R.; SPENGLER, A. N.; ZOIA, L. **Interferência da buva em áreas cultivadas com soja**. In: XXVII Congresso brasileiro da ciência das plantas daninhas. Ribeirão Preto, SP. Anais, 2010, p.1555–1558.

GE, X.; D'AVIGNON, D.A.; ACKERMAN, J.J.H.; SAMMONS, R.D. **Rapid vacuolar sequestration: the horseweed glyphosate resistance mechanism**. Pest Management Science, v. 66, p. 345–348, 2010.

G HARDE, Y.; SINGH, P. K.; DUBEY, R. P.; GUPTA, P. K. **Assessment of yield and economic losses in agriculture due to weeds in India**. Crop Protection, v. 107, p. 12–18, 2018.

GRESSEL, J. **Why get resistance? It can be prevented or delayed**. In: CASELEY, J.C.; CUSSANS, G.W.; ATKIN, R.K. Herbicide resistance in weeds and crops. Oxford: Butterworth-Heinemann, p. 1–25, 1991.

- HEAP I. 2019. **International survey of herbicide resistant weeds [online]**. Disponível em: <http://www.weedscience.org>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2019.
- HILTON, H.W. **Herbicide tolerant strains of weeds**. In Hawaiian Sugar Planters Association Annual Report (Hawaiian Sugar Planters Association ed), 1957, p. 69–72.
- KANG, J.; PARK, J.; CHOI, H.; BURLA, B.; KRETZSCHMAR, T.; LEE, Y.; MARTINOIA, E. **Plant ABC transporters**. Arabidopsis Book 9:e0153, 2011.
- KISSMANN, K. G. **Resistência de plantas a herbicidas**. São Paulo: Basf Brasileira, 1996, 33 p.
- LAFOREST, M.; SOUFIANE, B.; SIMARD, M.-J.; OBEID, K.; PAGE, E.; NURSE, R. E. **Acetyl-CoA carboxylase overexpression in herbicide-resistant large crabgrass (*Digitaria sanguinalis*)**. Pest management science, v. 73, n. 11, p. 2227-2235, 2017.
- LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. **Resistência ao glyphosate em biótipos de *Conyza bonariensis* e *Conyza canadensis* no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil**. Planta Daninha, v. 26, n. 2, p. 467-471, 2008.
- NEVE, P.; VILA-AIUB, M.; ROUX, F. **Evolutionary-thinking in agricultural weed management**. New Phytologist. v. 184, n. 4, p. 783–793, 2009.
- PENG, Y.; ABERCROMBIE, L. L. G.; YUAN, J. S.; RIGGINS, C. W.; SAMMONS, R. D.; TRANEL, P. J.; STEWART, C. N. JR. **Characterization of the horseweed (*Conyza canadensis*) transcriptome using GS-FLX 454 pyrosequencing and its application for expression analysis of candidate non-target herbicide resistance genes**. Pest Management Science, v. 66, p. 1053–1062, 2010.
- POWLES, S. B.; YU, Q. **Evolution in action: plants resistant to herbicides**. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v. 61, n. 1, p. 317–347, 2010.
- SAMMONS, R. D.; GAINES, T. A. **Glyphosate resistance: state of knowledge**. Pest Management Science. v.70, p.1367–1377, 2014.
- SANTOS, G.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; FRANCISCHINI, A. C.; OSIPE, J. B. **Multiple resistance of *Conyza sumatrensis* to Chlorimuronethyl and to Glyphosate**. Planta Daninha, v. 32, n. 2, p. 409–416, 2014
- SEEFELDT, S.S.; JENSEN, J.E.; FUERST, E.P. **Loglogistic analysis of herbicide dose-response relationships**. Weed Technology, v.9, n.2, p.218–227, 1995.
- SHANER, D. L.; LINDENMEYER, R. B.; OSTLIE, M. H. **What have the mechanisms of resistance to glyphosate taught us?** Pest Management Science, v. 68, n. 1, p. 3–9, 2011.
- STREIBIG J.C. **Herbicide bioassay**. Weed Research, v. 28, p. 479–84, 1998.
- SWANTON, C. J.; NKOA, R.; BLACKSHAW, R. E. **Experimental methods for crop–weed competition studies**. Weed Science, v. 63, n. SP1, p. 2–11, 2015.
- STANNARD, M.E.; FAY, P.K. **Selection of alfalfa seedlings for tolerance to chlorsulfuron**. In: Weed Science Society of America Meeting, 61. Proceedings, 1987, 45 p.
- TREZZI, M. M.; VIDAL, R. A.; PATEL, F.; MIOTTO JR, E.; DEBASTIANI, F.; BALBINOT JR, A. A.; MOSQUEN, R. **Impact of *Conyza bonariensis* density and establishment period on soyabean grain yield, yield components and economic threshold**. Weed research, v. 55, n.1, p. 34–41, 2015.
- WANG, J.-G.; LEE, P. K.-M.; DONG, Y.-H.; PANG, S. S.; DUGGLEBY, R. G.; LI, Z.-M.; GUDDAT, L. W. **Crystal structures of two novel sulfonylurea herbicides in complex with *Arabidopsis thaliana***

acetohydroxyacid synthase. FEBS Journal, v. 276, n. 5, p.1282–1290, 2009.

WSSA-Weed Science Society of America. **Resistance and tolerance definitions**. Weed Technology, v.12, p.789, 1998.

YU L. P. C.; KIM, Y. S.; Tong, L. **Mechanism for the inhibition of the carboxyltransferase domain of acetyl-coenzyme A carboxylase by pinoxaden**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 107, n. 51, p. 22072–22077, 2010.

YU, Q.; AHMAD-HAMDANI, M. S.; HAN, H.; CHRISTOFFERS, M. J.; POWLES, S. B. **Herbicide resistance-endowing ACCase gene mutations in hexaploid wild oat (*Avena fatua*): insights into resistance evolution ALS Genes in *A. aequalis* in a hexaploid species**. Heredity, v. 110, p. 220–231, 2013.

YUAN, J. S.; TRANEL, P. J.; STEWART, C. N. **Non-target-site herbicide resistance: a family business**. Trends in Plant Science, v. 12, n. 1, p. 6–13, 2007.

FITORREMEDIAÇÃO DE HERBICIDAS

Amanda dos Santos Souza

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Gabriella Francisco Pereira Borges De Oliveira

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Ana Claudia Langaro

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Monara Abreu Mendes

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Jonathan Almeida Santos Simões

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Junior Borella

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Camila Ferreira De Pinho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

RESUMO: A fitorremediação é uma técnica que utiliza plantas como agentes remediadores de solos, sedimentos e recursos hídricos contaminados, a fim de imobilizar, reter, degradar ou reduzir a níveis não tóxicos os contaminantes ambientais. A técnica apresenta uma série de

benefícios, como o baixo custo, o potencial para ser aplicados em grandes áreas e menor agressão ao ambiente. Dessa forma, estudos relacionados à avaliação do sistema solo-planta-polvente são necessários para elucidar a capacidade das plantas fitorremediadoras e promover avanços na promissora área de pesquisa de descontaminação do ambiente.

PALAVRAS-CHAVE: solo; contaminação; controle químico; biorremediação.

ABSTRACT: Phytoremediation is a technique that uses plants as remediation agents of soils, sediments and water that are contaminated in order to immobilize, retain, degrade or reduce environmental contaminants to non-toxic levels. The technique has a lot of benefits, such as low cost, potential to be applied in large areas and less harmful to the environment. Thus, studies that promote evaluation of soil-plant-pollutant system are necessary to elucidate the capacity of phytoremediation plants and to promote advances in this promising area of environmental decontamination researches.

KEYWORDS: soil; contamination; chemical control; bioremediation.

1 | INTRODUÇÃO

Diante dos problemas ambientais presenciados pela população mundial, a

responsabilidade por soluções sustentáveis tem se tornado crescente. Várias são as iniciativas locais e globais para preservação dos recursos naturais e para consolidação de manejos ecologicamente corretos. Dentro deste âmbito, a agricultura apresenta-se como um grande desafio, considerando que soluções sustentáveis para esse setor devem estar aliadas ao aumento da produção agrícola.

Na agricultura, os insumos agrícolas são largamente utilizados, sendo os agrotóxicos os mais relevantes mundialmente, com seu consumo diretamente relacionado com a evolução da área cultivada e da produtividade agrícola (ANVISA & UFPR, 2012). Ressalta-se que, no Brasil, os herbicidas representam 45% do total comercializado (ANVISA & UFPR, 2012).

Os herbicidas realizam o controle de plantas daninhas e, geralmente, são empregados em áreas de grande extensão. Especificamente para culturas que necessitam de um longo período total de prevenção de interferência, os herbicidas com efeito residual no solo são imprescindíveis para o controle efetivo das plantas daninhas (PIRES et al., 2006). Dessa forma, na grande maioria das vezes, apenas uma aplicação do herbicida no solo já é suficiente para manter a cultura livre da presença das plantas daninhas até o término desse período. Por outro lado, dependendo de fatores, como o tipo de solo, as características dos herbicidas e as condições climáticas, a dinâmica das moléculas dos herbicidas no solo pode ser modificada, facilitando processos de lixiviação para camadas mais profundas no perfil do solo com potencial de atingir o lençol freático (VIVIAN et al., 2006) ou de escoamento superficial, podendo ocasionar a contaminação de águas superficiais (MARTINI et al., 2012).

A grande maioria dos herbicidas utilizados são moléculas orgânicas, oriundas de rotas sintéticas não encontradas na natureza, sendo denominados xenobióticos (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006). A destinação dos diferentes xenobióticos aplicados no solo tem recebido atenção especial da comunidade científica, visando, além de orientar seu emprego de forma correta, racional e eficiente, possibilitar que sua ação cause o mínimo de danos ao ambiente (MANDALÃO et al., 2012).

Na busca de alternativas para minimizar os problemas supracitados, diversos métodos têm sido empregados para recuperação de solos contaminados. Nesse contexto, a biorremediação tem se difundido sendo uma técnica que utiliza organismos vivos para reduzir e/ou remover do ambiente os contaminantes do solo (PEREIRA & FREITAS, 2012). Entre as técnicas de biorremediação disponíveis, a fitorremediação emprega plantas tolerantes para a remoção de determinados produtos presentes em áreas contaminadas com substâncias orgânicas e inorgânicas (D'ANTONINO et al., 2009). No Brasil, estudos com fitorremediação têm sido conduzidos em áreas agricultáveis, uma vez que a técnica é considerada vantajosa, por sua eficiência na descontaminação e pelo baixo custo, além do caráter ambiental (SCRAMIN et al., 2001).

A técnica de fitorremediação para os solos contaminados com herbicidas possui certas limitações, pois as plantas fitorremediadoras, além de sobreviverem na presença

do herbicida, devem possuir características adequadas do ponto de vista agrônomo, como rápida propagação, excelente crescimento e fácil controle (PIRES et al., 2003). Sendo assim, a seleção de espécies com potencial para a fitorremediação apresenta grande importância no sentido de aprimorar a eficiência da técnica conforme cada caso.

2 | CONTROLE QUÍMICO

Os métodos de controle que podem ser utilizados para o manejo de plantas daninhas são o mecânico, químico e cultural, podendo ser utilizados isoladamente ou em conjunto (SILVA et al., 2012). Sempre que possível, deve-se utilizar dois ou mais métodos de manejo, visando minimizar ou mesmo eliminar a interferência causada pelas plantas daninhas na cultura, oferecendo assim maior eficácia, redução de custos, e maior segurança para o homem e menor dano ao ambiente (SIQUEIRA et al., 2014).

O controle químico é o mais utilizado quando comparado a outros métodos de controle devido sua rápida ação e maior eficiência no controle de plantas daninhas. Esse tipo de manejo consiste na utilização de herbicidas, os quais atuam nos processos bioquímicos e fisiológicos das plantas alvo, podendo retardar ou inibir o crescimento de plantas daninhas (BUENO et al., 2013).

Os herbicidas podem ser classificados conforme a época de aplicação em relação à cultura de interesse e às plantas daninhas, podendo ser de pré-emergência ou pós-emergência. A utilização de herbicidas pré-emergentes com residual longo é o que confere grande sucesso a essas moléculas no controle de plantas daninhas durante o período crítico de competição da cultura (ESQUIVEL et al., 2010; MANCUSO et al., 2011).

Os herbicidas pré-emergentes são aqueles aplicados diretamente ao solo com objetivo de eliminar as plantas daninhas logo após sua emergência, proporcionando que a cultura de interesse cresça sem a interferência precoce das plantas daninhas (INOUE et al., 2011). Os herbicidas aplicados em pré-emergência dependem de diversos fatores para efetivo controle de plantas daninhas, considerando que ao entrar em contato com o solo os herbicidas estão sujeitos a processos químicos, físicos e biológicos que regulam o seu destino no ambiente (DAN et al., 2012). Tais processos são importantes, porque influenciam na disponibilidade do produto, afetando sua eficiência, além de alterar processos como degradação, sorção e transporte destas moléculas (MONQUERO et al., 2013).

3 | RESIDUAL DE HERBICIDAS E CONTAMINAÇÃO DO AMBIENTE

Os herbicidas pré-emergentes com efeito residual longo possibilitam o controle das plantas daninhas por um maior período de tempo e conseqüentemente, reduzem

o número de aplicações de herbicidas necessárias para o controle efetivo das plantas daninhas. Porém, devido ao efeito residual longo apresentado por essas moléculas no solo, é possível que ocorra fitotoxicidade em culturas sensíveis plantadas em sucessão, sendo esse efeito conhecido como *carryover* (MELO et al., 2016). Esse fenômeno tem sido observado para os herbicidas atrazina e imazapic (SIQUEIRA et al., 1991; PINTO et al., 2009), além de outros, como tebuthiuron, fomesafen (PIRES et al., 2006), flumioxazin e metribuzim (RIBEIRO et al., 2018).

O residual de um herbicida no solo depende das características do solo, como tipo, teor de matéria orgânica e umidade, das características físico-química das moléculas e das condições ambientais ou também da interação desses fatores (REFATTI et al., 2014; BUNDT et al., 2015). Como foi observado em experimento, sobre a lixiviação do herbicida imazapir+imazapic em diferentes teores de umidade no solo, solos onde havia maior teores de umidade houve maior lixiviação da molécula de herbicida e em solos com menor umidade houve maior retenção da molécula no solo (SOUZA, 2018). Desta forma, a recomendação correta de herbicidas com residual longo deve considerar a interação solo-planta-herbicida, visando maior eficiência no controle de plantas daninhas e mínima contaminação do ambiente.

Os processos que propiciam a interação com o solo, a água e os organismos fazem parte de uma complexa coleção de reações químicas, físicas e biológicas, que destinam a molécula no ambiente (GAVRILESCU, 2005). Os processos podem ser divididos em: retenção, transporte e transformação.

A retenção da molécula no solo refere-se à habilidade do solo em reter uma molécula orgânica ou um herbicida, evitando que ela se mova tanto para dentro como para fora da matriz do solo (OLIVEIRA & BRIGHENTI, 2011). Esse processo envolve mecanismos específicos de dissipação de herbicidas, como precipitação, absorção e adsorção, que são regulados com as características do solo, como, textura, profundidade do solo, pH, teor de matéria orgânica, entre outros (ALLETTO et al., 2010).

Quando uma molécula do herbicida não está retida no solo, ela passa a sofrer o processo de transporte no solo e migrar dentro do perfil podendo contaminar cursos de água. O transporte de herbicida no solo é dependente das características do herbicida e de fatores externos, como propriedades físico-químicas dos solos, condições de umidade e temperatura (MENDES et al., 2014). Entre as principais formas de transporte, pode-se destacar a volatilização, o escoamento superficial e subsuperficial e a lixiviação, que podem contaminar a atmosfera e os recursos hídricos (ALLETTO et al., 2010).

O terceiro processo que o herbicida está suscetível é a transformação, que é decorrente da degradação dessas moléculas a compostos secundários ou mesmo a sua completa mineralização. No geral, a degradação refere-se ao conjunto de transformações químicas, físicas e biológicas, que levam à formação de metabólitos não-tóxicos ou à completa degradação a CO₂, água e compostos inorgânicos

(ANDRIGHETTI et al., 2014).

4 | BIORREMEDIAÇÃO

As estratégias de descontaminação do solo e das águas podem ser físicas, químicas, biológicas ou uma combinação de todas essas abordagens (PASCAL-LORBER & LAURENT, 2011). Dentro das técnicas envolvidas para remediar o solo, existe a biorremediação, definida como um processo de conversão parcial ou completa dos poluentes do ambiente, para o qual são utilizados organismos vivos, normalmente plantas ou microrganismos. A eficiência da biorremediação é dependente da biodisponibilidade do contaminante e do potencial de remediação dos organismos (EEVERS et al., 2017).

O processo de biorremediação é uma alternativa ecologicamente eficaz para o tratamento de ambientes contaminados por moléculas orgânicas de difícil degradação. A realização desta prática pode ser feita no local da contaminação (*in-situ*) ou realizada fora do local onde ocorreu a contaminação (*ex-situ*) (ANDRADE et al., 2010). As principais técnicas *ex-situ* conhecidas são por meio de biorreatores, *landfarming* e biopilhas ou compostagem. Entre as técnicas *in-situ*, pode-se citar a bioestimulação, o bioaumento e a biodegradação (JACQUES et al., 2007).

5 | FITORREMEDIAÇÃO

Inserida na biorremediação, a fitorremediação consiste na utilização de plantas para o controle e/ou descontaminação de resíduos (EEVERS et al., 2017). Essa técnica visa degradar, reter, imobilizar ou reduzir os poluentes do solo a níveis não tóxicos, por meio de processos que procuram recuperar a matriz do solo ou da água subterrânea e estabilizar o contaminante (CUNNINGHAM et al., 1996; ACCIOLY; SIQUEIRA, 2000).

A técnica de fitorremediação apresenta grande potencial de uso, já que é considerada economicamente viável. Além disso, outras vantagens são observadas como facilidade no monitoramento da técnica, manutenção das propriedades do solo, possibilidade de incorporação das plantas ao solo servindo como fonte de adubo, entre outras (OLIVEIRA et al., 2006). Entretanto, ainda há diversas limitações no uso da técnica em áreas agrícolas como dificuldade na seleção das plantas, o contaminante deve estar dentro da zona de alcance radicular das fitorremediadoras, as condições ambientais podem restringir o crescimento das plantas, as plantas fitorremediadoras podem se tornar daninhas, entre outras (OLIVEIRA et al., 2006; MARIANO & OKUMURA, 2012).

A fitorremediação de herbicidas é fundamentada na seletividade, natural ou desenvolvida, que algumas espécies apresentam a certos tipos de mecanismos de ação e compostos. A seletividade apresentada por essas plantas é devida à capacidade

de acumulação, degradação ou transformação dos herbicidas em compostos menos tóxicos ao ambiente (PIRES et al., 2003).

6 | MECANISMOS DE FITORREMEDIAÇÃO

A fitorremediação pode ser classificada em cinco processos fisiológicos das plantas, denominados: fitoestabilização, fitovolatilização, fitodegradação, fitoestimulação/rizodegradação e fitoextração (PILON-SMITS, 2005).

A fitoestabilização é usada quando o propósito é manutenção do solo e dos sedimentos contaminados no local, prevenindo perdas por erosão ou lixiviação (PILON-SMITS, 2005). Os tecidos vegetais imobilizam, lignificam ou humidificam os contaminantes (TAVARES, 2013)

A fitovolatilização ocorre quando a planta absorve e converte as substâncias químicas orgânicas voláteis em formas menos ou não tóxicas que são posteriormente liberadas na atmosfera (WATANABE, 1997). Após a absorção, o contaminante pode passar por uma série de transformações e processos metabólicos, para posteriormente ser liberado pela superfície das folhas, podendo esta liberação ocorrer da forma original ou transformada (ANDRADE et al., 2007).

Os processos que envolvem a fitodegradação são baseados na absorção do contaminante pela planta, que realiza processos metabólicos degradando-os a formas menos tóxicas. Esse tipo de processo envolve ação de enzimas específicas, como as nitroredutases, desalogenases e lacases (CUNNINGHAM et al., 1996). A fitodegradação é muito eficaz para poluentes orgânicos que possuem mobilidade na planta, como é o caso dos herbicidas. Em sua degradação há ação de complexos enzimáticos, tais como glutatona e citocromo P-450 monoxigenases (LAMEGO; VIDAL, 2007).

A fitoestimulação ou rizodegradação compreende a degradação do contaminante orgânico do solo pelos microrganismos, localizados na região da rizosfera, estimulados pelas plantas (FAVAS et al., 2014). O estímulo causado pelas plantas na liberação de exsudatos radiculares promove a proliferação de microrganismos degradativos na rizosfera, os quais usam os metabólitos exsudatos pela planta como fonte de carbono e energia (OLIVEIRA et al., 2006; FAVAS et al., 2014).

A fitoextração ocorre quando as plantas absorvem por meio das raízes o contaminante do solo, onde são armazenados ou transportados e acumulados na parte aérea (SUSARLA et al., 2002; FAVAS et al., 2014). Cabe ressaltar que neste processo não há degradação do contaminante pela planta, sendo este processo eficiente apenas se a planta for removida do solo, uma vez que, a planta é considerada hiperacumuladora do contaminante. Após a retirada das plantas, estas devem passar por processos físicos, químicos ou biológicos para extração dos contaminantes (LAMEGO & VIDAL, 2007).

7 | SELEÇÃO DE ESPÉCIES FITORREMEIADORAS

A escolha da espécie para a fitorremediação é de extrema importância, pois essas devem reunir características favoráveis que serão usadas como indicativo para seleção. Para ser considerada uma planta fitorremediadora satisfatória, as seguintes características devem ser observadas (ACCIOLY & SIQUEIRA, 2000; PIRES et al., 2003, MARIANO & OKUMURA, 2012):

- Capacidade de sobreviver em meio ao contaminante;
- Rápido crescimento;
- Elevada produção de biomassa;
- Competitividade;
- Capacidade de absorver, concentrar e/ou metabolizar o contaminante;
- Sistema radicular profundo e denso;
- Fácil controle ou eliminação;
- Resistência a pragas e doenças.

A seleção de plantas para remediação de compostos herbicidas tem limitações mais complexas, uma vez que herbicidas apresentam uma grande diversidade molecular e maior complexidade nas análises, uma vez que podem passar por diversas transformações (PIRES et al., 2003). A seleção deve ser baseada, nas características químicas e físicas do contaminante, como o tempo de contaminação, composição e concentração do contaminante no solo; do solo a ser tratado; da topografia da área e das condições climáticas e ambientais (PIRES et al., 2003; PROCÓPIO et al., 2005)

Diversas plantas já foram relatadas com potencial para fitorremediar solos contaminados com herbicidas, como apresentado na Tabela 1.

Plantas	Herbicidas	Referência
<i>Acorus calamus</i>	Atrazina	Wang et al., 2012
<i>Andropogon gerardii</i>	Atrazina, metolachlor, pendimentalina	Zhao et al., 2005; Henderson et al., 2006
<i>Digitaria sp.</i>	Atrazina, metolachlor, trifluralina	Anderson, Kruger, & Coats, 1994
<i>Lemna punctate</i>	Atrazina, 2,4-dichlorophenoxyacetic acid, picloram	Reinhold et al., 2010
<i>Lolium perenne</i>	2,4-Dichlorophenoxyacetic acid	Shaw & Burns, 2004
<i>Nicotiana tabacum</i>	Sulfentrazone	Ferrell et al., 2003
<i>Panicum virgatum</i>	Atrazina, metolachlor, pendimethalin	Zhao et al., 2005; Henderson et al., 2006
<i>Zea mays</i>	Endosulfan	Mukherjee & Kumar, 2012

<i>Canavalia ensiformes</i>	Tebuthiuron	Pires et al., 2003
<i>Pennisetum typhoides</i>	Tebuthiuron	Pires et al., 2003

Tabela 1. Visão geral das espécies vegetais que possuem potencial de fitorremediação de solos contaminados com herbicidas. Adaptado de EEVERS et al., 2017.

8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de agrotóxicos deve ser realizado de forma racional, responsável e com mínimo de contaminação ao ambiente. Dessa forma, estratégias devem ser traçadas no sentido de promover a descontaminação total ou parcial de áreas agrícolas que utilizam essas moléculas, com objetivo de viabilizar o uso destas áreas para o cultivo de espécies sensíveis. Nesse sentido, a fitorremediação de áreas contaminadas por herbicidas, é considerada uma importante ferramenta para a descontaminação do solo pelas vantagens que apresenta em relação a outras técnicas, como a viabilidade econômica e a facilidade de monitoramento.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A. M. A.; SIQUEIRA, J. O. **Contaminação química e biorremediação do solo**. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v. 1, p. 299-352.
- ALLETTO, L.; COQUETE, Y.; BENOIT, P.; HEDDADJ, D.; BARRIUSO, E. **Tillage management effects on pesticide fate in soils. A review**. *Agronomy For Sustainable Development*, v. 30, n. 2, p.367-400, 2010.
- ANDERSON, T. A.; KRUGER, E. L.; COATS, J. R. **Enhanced degradation of a mixture of three herbicides in the rhizosphere of a herbicide-tolerant plant**. *Chemosphere*, v. 28, n. 8, p.1551-1557, 1994.
- ANDRADE, J. A.; AUGUSTO, F.; JARDIM, I. C. S. F. **Biorremediação de Solos contaminados por Petróleo e seus derivados**. *Eclética Química*, v. 35, n. 3, p. 17-43, 2010.
- ANDRADE, J. C. M; TAVARES, S. R. L.; MAHLER, C. F. **Fitorremediação: o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2007. 176p.
- ANDRIGHETTI, S. M.; NACHTIGALL, G.R.; QUEIROZ, S. C. N.; FERRACINI, V. L.; AYUB, M. A. Z. **Biodegradação de glifosato pela microbiota de solos cultivados com macieira**. *Revista Brasileira de Ciências no Solo*, v. 38 n.5, 2014.
- ANVISA; UFPR. **Seminário de mercado de agrotóxico e regulação**. Brasília: Anvisa, 2012.
- BUENO, M. R.; ALVES, G. S.; PAULA, A. D. M.; CUNHA, J. P. A. R. **Volumes de calda e adjuvante no controle de plantas daninhas com glyphosate**. *Planta Daninha*, v. 31, n. 3, p. 705-713, 2013.
- BUNDT, A.D.C.; AVILA, L.A.; AGOSTINETTO, D.; NOHATTO, M.A.; VARGAS, H.C. **Carryover of imazethapyr + imazapic on ryegrass and non-tolerant rice as affected by thickness of soil profile**. *Planta Daninha*, v. 33, n. 2, p. 357-364, 2015.

- CUNNINGHAM, S. D.; ANDERSON, T. A.; SCHWAB, A. P. **Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants**. *Advances in Agronomy*, v. 56, n. 1, p. 55-114, 1996.
- D'ANTONINO, L.; SILVA, A. A.; FERREIRA, L. R.; CECON, P. R.; QUIRINO, A. L. S.; FREITAS, L. H. L. **Efeitos de culturas na persistência de herbicidas auxínicos no solo**. *Planta Daninha*, v. 27, n. 2, p. 371-378, 2009.
- DAN, H. A.; DAN, L. G. M.; BARROSO, A. L. L.; PROCÓPIO, S. O.; OLIVEIRA JR., R. S.; BRAZ, G. B. P.; ALONSO, D. G. **Atividade residual de herbicidas usados na soja sobre o girassol cultivado em sucessão**. *Ciência Rural*, v.42 n. 11, 2012.
- EEVERS, N.; WHITE, J. C.; VANGRONSVELD, J.; WEYENS, N. **Bio- and Phytoremediation of Pesticide-Contaminated Environments**. *Advances in Botanical Research*, 2017, p 277–318.
- ESQUIVEL, V. A. E.; GONZÁLEZ, X. R.; LEOR, E. N. B. **Evaluación de herbicidas residuales para el control de malezas em Guanábana (*Annona muricata* L.)**. *Revista Chapingo: Serie Horticultura*, v.16, n.1, p.5-12, 2010.
- FAVAS, P. J. C.; PRATAS, J; VARUN, M.; D'SOUZA, R; PAUL, M. S. **Phytoremediation of soils contaminated with metals and metalloids at mining areas: potential of native flora**. In: SOARIANO, M.C.H. (Ed.). *Environmental risk assessment of soil contamination*. Rijeka: InTech, 2014. p.485-451.
- FERRELL, J. A.; WITT, W. W.; VENCILL, W. K. **Sulfentrazone absorption by plant roots increases as soil or solution pH decreases**. *Weed Science*, v.51, p.826-830, 2003.
- GAVRILESCU, M. **Fate of pesticides in the environment and its bioremediation**. *Engineering in Life Sciences*, v. 5, n. 6, p. 497-526, 2005.
- HENDERSON, K. L. D.; BELDEN, J. B.; ZHAO, S.; COATS, J. R. **Phytoremediation of pesticide wastes in soil**. *Verslag der Zeitschrift für Naturforschung*, v.61, p.213-221, 2006.
- INOUE, M.H.; MENDES, K.F.; SANTANA, C.T.; POSSAMAI, A.C.S. **Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados em solos contrastantes**. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v.10, n.3, p.232-242, 2011.
- JACQUES, R. J. S.; BENTO, F. M.; ANTONIOLLI, Z. I.; CAMARGO, F. A. O. **Bioremediation of soils contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons**. *Rural Science*, v.37, n.4, p. 1192-1201, 2007.
- JÚNIOR, C. H. A.; BOARETTO, A. E.; MURAOKA, T.; KIEHL, J. C. **Uso agrícola de resíduos orgânicos potencialmente poluentes: propriedades químicas do solo e produção vegetal**. In: *Tópicos em Ciência do Solo*, v.4, Viçosa: SBCS, 2005. p.391-470.
- LAMEGO, F. P.; VIDAL, R. A. **Fitorremediação: Plantas como agentes de despoluição?**. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente*, v. 17, p. 9-18, 2007.
- MANDALÃO, J. C.; PIRES, F. R.; FILHO, A. C.; CHAGAS, K.; NASCIMENTO, A. F.; GARCIA, G. O. **Fitorremediação de solos contaminados com o herbicida sulfentrazone por espécies de adubos verdes**. *Revista Ciências Agrárias*, v. 55, n. 4, p. 288-296, 2012.
- MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. **Efeito residual de herbicidas no solo ("Carryover")**. *Revista Brasileira de Herbicidas*, v.10, n.2, p.151-164, 2011.
- MARIANO, D. C.; OKUMURA, R. S. **Aspectos agrônômicos, uso pelo homem e mecanismos da fitorremediação: uma revisão**. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v.5, n. Edição Especial, p. 85-101, 2012.

- MARTINII, L. F. D.; S S.; CALDAS, L. F. D.; BOLZAN, C. M.; BUNDT, A. C. **Risco de contaminação das águas de superfície e subterrâneas por agrotóxicos recomendados para a cultura do arroz irrigado**. Ciência Rural, v. 42, n. 10, p.1715-1721, 2012.
- MELO, C., DIAS, R., MENDES, K., ASSIS, A., & REIS, M. **Carryover de herbicidas em sistemas cultivados com olerícolas**. Revista Brasileira De Herbicidas, v.15, n.1, p. 67-78, 2016.
- MENDES, K. F.; REIS, M. R.; DIAS, A. C. R.; FORMIGA, J. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; TORNISIELO, V. L. **A proposal to standardize herbicide sorption coefficients in Brazilian tropical soils compared to temperate soils**. Journal of Food, Agriculture & Environment. v.12 n.3 & 4, p. 424-433, 2014
- MONQUERO, P A.; MUNHOZ, W. S.; HIRATA, A. C. S. **Persistência de imazaquim e diclosulam em função da umidade do solo**. Revista Agroambiente, v. 7, n. 3, p. 331-337, 2013.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.O. **Xenobióticos do solo**. Microbiologia e Bioquímica do Solo. Cap. 6. p. 263-311, 2006.
- MUKHERJEE, I., KUMAR, A. **Phytoextraction of endosulfan: A remediation technique**. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, v.88, p.250-254, 2012.
- OLIVEIRA, D. M.; Cara, D. V. C.; Xavier, P. G.; Paula, M. S.; Sobral, L. G. S.; Lima, R. B.; Loureiro, A. **Fitorremediação: o estado da arte**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2006. 49p.
- OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. **Comportamento de herbicidas no ambiente**. In: OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. Biologia e manejo de plantas daninhas. Curitiba: Ompipax, 2011. p.263-304.
- PASCAL-LORBER, S.; LAURENT, F. **Phytoremediation Techniques for Pesticide Contamination**. Alternative Systems of Agriculture, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilization, p.77-105, 2010.
- PEREIRA, A. R. B.; FREITAS, D. A. F. **Uso de microorganismos para a biorremediação de ambientes impactados**. Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 6, n. 6, p. 975-1006, 2012.
- PILON-SMITS, E. **Phytoremediation**. Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, v.56, p.15-39, 2005.
- PINTO, J. O.; NOLDIN J. A.; MACHADO, A.; PINHO, C. F.; ROSENTHAL, M. D.; DONIDA, A.; GALON, L.; DURIGAN, M. **Milho (*Zea mays*) como espécies bioindicadora da atividade residual de (imazapyr + imazapic)**. Planta Daninha, v.27, n. especial, p. 1005-1014, 2009.
- PIRES, F. R.; PROCÓPIO, S. O.; SOUZA C. M.; SANTOS, J. B.; SILVA, G. P. **Adubos verdes na fitorremediação de solos contaminados com o herbicida tebuthiuron**. Caatinga, v. 19, n. 1, p. 92-97, 2006.
- PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; SILVA, A. A.; QUEIROZ, M. E. L. R.; PROCÓPIO, S.O.; SANTOS, J. B.; SANTOS, E. A.; CECON, P. R. **Seleção de plantas tolerantes ao Tebuthiuron e com potencial para fitorremediação**. Revista Ceres, v. 50, n. 291, p. 583-594, 2003.
- PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J.B.; SILVA, A.A.; PIRES, F.R.; RIBEIRO JÚNIOR, J.I.; SANTOS, E.A. **Potencial de espécies vegetais para a remediação do herbicida Trifloxysulfuron-Sodium**. Planta Daninha, v. 23, n. 1, p. 9-16, 2005.
- RAIMONDI, M.A.; OLIVEIRA JR, R.S.; CONSTANTIN, J.; BIFFE, D.F.; ARANTES, J.G.Z.; FRANCHINI, L.H.; RIOS, F.A.; BLAINSKI, E.; OSIPE, J. B. **Atividade residual de herbicidas aplicados ao solo em relação ao controle de quatro espécies de *Amaranthus***. Planta Daninha, Viçosa-MG, v. 28, p. 1073-1085, 2010.

- REFATTI, J. P.; AVILA, L. A.; AGOSTINETTO, D.; MANICA-BERTO, R.; BUNDT, A. C.; ELGUEIRA, D. B. **Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapir em solo de cultivo de arroz irrigado**. *Ciência Rural*, v. 44, n.6, p. 1008-1014, 2014.
- REINHOLD, D.; VISHWANATHAN, S.; PARK, J. J.; OH, D.; SAUNDERS, F. M. **Assessment of plant-driven removal of emerging organic pollutants by duckweed**. *Chemosphere*, v.80, n.7, p.687-692, 2010.
- RIBEIRO, S. R. S; MARINHO, F. S.; SOUZA, A. S; CARVALHO, G. S; MENDES, M. A; AMORIM, E. S.; PINHO, C. F. Efeito residual de flumioxazim e metribuzim em melancia cultivada em sucessão a soja. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 31., 2018, Rio de Janeiro. **DESAFIOS E SUSTENTABILIDADE NO MANEJO DE PLANTAS DANINHAS**. Rio de Janeiro: SBCPD, 2018. p. 892 – 892
- SCRAMIN, S.; SKORUPA, L. A.; MELO, I. S. **Utilização de plantas na remediação de solos contaminados por herbicidas – levantamento da flora existente em áreas de cultivo de cana-de-açúcar**. In: MELO, I. S. et al. *Biodegradação*. Jaguariúna, SP: EMBRAPA, p. 369-371, 2001.
- SHAW, L. J.; BURNS, R. G. **Enhanced mineralization of [U-14C]2,4-dichlorophenoxyacetic acid in soil from the rhizosphere of *Trifolium pratense***. *Applied and Environmental Microbiology*, v.70, n.8, p.4766-4774, 2004.
- SILVA, D.V.; SANTOS, J.B.; FERREIRA, E.A.; SILVA, A.A.; FRANÇA, A.C.; SEDIYAMA, T. **Manejo de plantas daninhas na cultura da mandioca**. *Planta Daninha*, v. 30, n. 4, p. 901-910; 2012.
- SIQUEIRA, J. O.; SAFIR, G. R.; NAIR, M. G. **VA-mycorrhizae and mycorrhizal stimulating isoflavonoid compounds reduce plant herbicide injury**. *Plant Soil*, v. 34, p. 233-242, 1991.
- SIQUEIRA, R. H. S; ALCÂNTARA, E. N.; FERREIRA, M. M.; CARVALHO, R. C. S.; **Agregação de um latossolo vermelho-amarelo submetido a métodos de controle de plantas invasoras na cultura do café**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 38, n. 6, p. 1128-1134, 2014.
- SOUZA, Amanda dos Santos. **Lixiviação e residual em solo da mistura comercial dos herbicidas imazapir+imazapic**. 2018. 71p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2018.
- STEFFEN, G. P. K.; STEFFEN, R. B.; ANTONIOLLI, Z. I. **Contaminação do solo e da água pelo uso de agrotóxicos**. *Tecnológica*, Santa Cruz do Sul, v. 1, n. 15, p.15-21, jun. 2011.
- SUSARLA, S.; MEDINA, V. F.; McCUTCHEON, S. C. **Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination**. *Ecological Engineering*, v. 18, n. 5, p. 647-658, 2002.
- TAVARES, S. R. L. Técnicas de remediação. In: TAVARES, S. R. L. (Org.). **Remediação de solos e águas contaminadas: conceitos básicos e fundamentos**. São Paulo: Clube de Autores, 2013. p.59- 90.
- VARGAS, L.; ADEGAS, F.; GAZZIERO, D.; KARAM, D.; AGOSTINETTO, D.; DA SILVA, W. T. **Resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil: histórico, distribuição, impacto econômico, manejo e prevenção**. Embrapa Trigo-Capítulo em livro científico, 2014.
- VIVIAN, R.; REIS, M. R.; JAKELAITIS, A.; SILVA, A. F.; GUIMARÃES, A. A. SANTOS, J. B.; SILVA, A. A. **Persistência de sulfentrazone em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. *Planta Daninha*, v.24, n.4, p.741-750, 2006.
- WANG, Q.; ZHANG, W. X.; LI, C.; XIAO, B. **Phytoremediation of atrazine by three emergent hydrophytes in a hydroponic system**. *Water Science and Technology*, v.66, n.6, p.1282-1288, 2012.

WATANABE, M. E. **Phytoremediation on the brink of commercialization.** Environmental Science & Technology, v.31, p.82-186, 1997.

ZHAO, S., ARTHUR, E. L., MOORMAN, T. B., & COATS, J. R. **Evaluation of microbial inoculation and vegetation to enhance the dissipation of atrazine and metolachlor in soil.** Environmental Toxicology and Chemistry, v.24, n.10, p.2428-2434, 2005.

MISTURA EM TANQUE E INTERAÇÕES ENTRE HERBICIDAS

Jéssica Ferreira Lourenço Leal

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Gabriella Francisco Pereira Borges de Oliveira

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Amanda Dos Santos Souza

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Marcelo Pereira Sampaio

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Eduardo Souza De Amorim

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Ana Claudia Langaro

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

Camila Ferreira De Pinho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – Rio de Janeiro

RESUMO: O Brasil está entre os maiores produtores agrícolas do mundo. Porém, atualmente plantas daninhas de difícil controle vêm ocasionando grandes problemas no sistema de produção, principalmente quando há infestação de plantas monocotiledôneas e

eudicotiledôneas na mesma área, assim como de plantas daninhas em estágio fenológico avançado, onde há necessidade da associação de herbicida em mistura ou sequencial para controle efetivo. A associação ou mistura de herbicidas, baseia-se na utilização simultânea ou sequencial de dois ou mais herbicidas aplicados sobre a mesma área ou cultura. Essa associação produz interações entre os herbicidas, que podem gerar incompatibilidade físico-química na calda ou biologicamente na planta causando efeito sinérgico, aditivo ou antagônico em relação ao efeito de cada herbicida utilizado isoladamente. Diante do exposto, alguns estudos relatam efeitos antagônicos quando herbicidas para controle de monocotiledôneas são aplicados juntamente ou após os herbicidas para controle de dicotiledôneas. Entretanto, o efeito resultante pode ser maximizado ou minimizado conforme o intervalo entre as aplicações dos herbicidas adotados no sistema.

PALAVRAS-CHAVE: planta daninha; antagonismo; sinergismo; estágio fenológico; compatibilidade.

ABSTRACT: Brazil is among the largest agricultural producers in the world. However, difficult control weeds currently cause huge problems in the production system, especially when there is infestation of both

monocotyledonous and dicotyledonous plants in the same area and weeds in advanced phenological stage. In this case, there is necessary to promote a mixture of herbicides or sequential applications of them for effective control. The combination or mixture of herbicides is based on the simultaneous or sequential use of two or more herbicides applied to the same area or crop. This combination produces interactions between the herbicides, which can cause physicochemical incompatibility in the tank or biologically effects in the plant causing synergistic, additive or antagonistic effects in relation to the effect of each herbicide used alone. Considering this, some studies report antagonistic effects when herbicides used to control monocotyledons plants are applied together or after the herbicides used to control dicotyledonous plants. However, the resulting effect can be maximized or minimized depending on the interval between herbicide applications adopted in the system.

KEYWORDS: weed; antagonism; synergism; phenological stage; compatibility.

1 | INTRODUÇÃO

A agricultura é um dos setores mais relevantes para a economia brasileira, sendo o desenvolvimento e a produtividade das culturas atrelados a diversos fatores, entre eles a ocorrência de doenças, pragas e interferência de plantas daninhas.

As plantas daninhas englobam toda e qualquer planta que ocorre onde não é desejada ocasionando danos econômicos (PITELLI et al., 1987). Essas competem com a cultura de interesse por recursos essenciais, como água, luz e nutrientes; além de onerar, dificultar e até inviabilizar a colheita (VASCONCELOS et al., 2012). No Brasil, alguns estudos consideram que as perdas econômicas associadas à presença de plantas daninhas nas áreas de cultivo podem ser superiores a 30% da produção, principalmente, quando há casos de plantas daninhas resistentes a herbicidas (GAZZIERO et al., 2010; BLAINSKI et al., 2015; TREZZI E VIDAL 2015; ADEGAS et al., 2017).

A resistência de plantas daninhas é um tópico de crescente preocupação na agricultura. A Weed Science Society of America (1998) define resistência como a ocorrência natural da habilidade hereditária de alguns biótipos, dentro de uma população, em sobreviver e se reproduzir após o tratamento com um herbicida que seria letal aos demais indivíduos dessa mesma população. No Brasil, há relatos de 50 casos de plantas daninhas resistentes a herbicidas. Entre esses, oito abordam resistência ao herbicida glifosato dentre eles as espécies de buva (*Conyza bonariensis*, *Conyza canadensis*, *Conyza sumatrensis*), capim-amargoso (*Digitaria insularis*), capim-branco (*Chloris elata*), azevém (*Lolium perene*), caruru (*Amaranthus palmeri*) e pé-de-galinha (*Eleusine indica*) (HEAP, 2019).

Além dos casos de resistência a herbicidas, outro entrave no manejo de plantas daninhas são as plantas tolerantes a herbicidas. Nesse caso, a tolerância encontra-se associada com a capacidade inata de uma espécie em suportar aplicações de

herbicidas nas dosagens recomendadas sem alterações marcantes em seu crescimento e desenvolvimento (OLIVEIRA et al., 2011). Atualmente, no Brasil, as espécies erva-quebrada (*Spermacoce latifolia*), apaga-fogo (*Spermacoce verticillata*), trapoeraba (*Commelina benghalensis*), poaia (*Richardia brasiliensis*), leiteiro (*Euphorbia heterophylla*), corda-de-viola (*Ipomea grandifolia e Ipomoea nil*), erva-touro (*Tridax procumbens*) dentre outras, são consideradas tolerantes ao herbicida glifosato e de difícil controle (MONQUERO et al., 2004; GALON et al., 2013, FADIN et al., 2018).

O manejo de plantas daninhas é ainda mais complexo quando numa mesma área há infestação de plantas daninhas monocotiledôneas (folha estreitas) e eudicotiledôneas (folhas largas) resistentes e/ou tolerantes a herbicidas, ou ainda, plantas em diferentes estádios fenológicos. Nesses casos, há necessidade do uso de herbicidas de diferentes mecanismos de ação utilizados em mistura ou sequencial para controle um efetivo (TREZZI et al., 2007; ZOBIOLE et al., 2016).

2 | MANEJO DE PLANTAS DANINHAS NO BRASIL

A escolha dos herbicidas utilizados em mistura ou sequencial devem estar alinhados com as espécies presentes, estágio fenológico e tolerância/resistência das plantas a herbicidas.

2.1 Quanto às espécies presentes e à tolerância/resistência das plantas a herbicidas

Uma das práticas mais importantes no controle de plantas daninhas é a dessecação de áreas. O herbicida mais utilizado na dessecação é o glifosato, um herbicida sistêmico e não seletivo e de amplo espectro (DUKE e POWLES, 2008). No entanto, diversas espécies são tolerantes e/ou resistentes ao glifosato, sendo necessário a associação desse herbicida com outros de diferentes mecanismos de ação para obtenção de sucesso na dessecação, tais como: herbicidas mimetizadores de auxinas (2,4-D, dicamba, tricopyr, entre outros), inibidores da acetolactato sintase - ALS (clorimuron, cloransulam, entre outros), inibidores da protoporfirinogênio Oxidase - PROTOX (fomesafem, saflufenacil, entre outros), inibidores da acetil-CoA carboxilase - ACCase (cletodim, haloxifope, entre outros), inibidores do fotossistema I - FSI (paraquat e diquat), inibidores do fotossistema II - FSII (diuron) e inibidores da glutamina sintetase - GS (glufosinato).

Além disso, outro agravante é a presença de plantas monocotiledôneas e eudicotiledôneas de difícil controle simultaneamente nas áreas de produção. Para infestações de monocotiledôneas resistentes ao glifosato, como capim-amargoso, pé-de-galinha ou azevém, o controle baseia-se, principalmente, nos herbicidas inibidores da enzima ACCase - graminicidas (MELO et al., 2012; GEMELLI et al., 2012; CARPEJANI et al., 2013; ULGUIM al., 2013; MARIANI et al., 2016). Para espécies

eudicotiledôneas de difícil controle, resistentes ou tolerantes ao glifosato, como erva-quente, trapoeraba, poaia, leiteiro, corda-de-viola e buva, bons resultados de controle são observados através do uso de herbicidas inibidores da enzima ALS e mimetizador de auxina (MOREIRA et al., 2007; TAKANO et al., 2013; BRESSANIN et al., 2014; BLAINSKI et al. 2015; SANTOS et al., 2015).

Portanto, diante de uma infestação de plantas daninhas de folhas largas e estreitas resistentes ou tolerantes ao glifosato, há necessidade de mistura de herbicidas para controle de ambas espécies. Contudo, é necessário compreender as interações entre os herbicidas em mistura para obtenção do controle esperado.

2.2 Quanto ao estágio fenológico das plantas daninhas

Nas áreas agrícolas, além da problemática de plantas resistentes e tolerantes a herbicidas, é comum encontrar infestações de plantas daninhas em diferentes estádios fenológicos, ambas situações dificultam o controle e, muitas vezes, exigem aplicação sequencial ou mistura de herbicidas com diferentes mecanismos de ação.

O controle químico das plantas daninhas é diretamente dependente do estágio de desenvolvimento das mesmas. Osipe et al., (2017) constatou que a adição de 2,4-D ou dicamba ao glifosato é necessário para controle de plantas tolerantes ou resistentes (trapoeraba, poaia, corda-de-viola e buva) ao glifosato, principalmente quando estas plantas estão em estágio de desenvolvimento avançado.

O controle de plantas de buva em estágio avançado, só é possível mediante a aplicação sequencial ou mistura (MOREIRA et al., 2010). Assim, como plantas o capim-amargoso em estágio de pleno florescimento, onde uma única aplicação de graminicida (haloxifope, clethodim, quizalofope, fluazifope, dentre outros) não é eficaz, sendo crucial aplicações sequenciais para promover o controle adequado da espécie (CORREIA et al.; 2009; ZOBIOLE et al., 2016).

O mesmo se aplica no controle de capim pédegalinha. O controle do pé-degalinha com glifosato varia em função de estágio fenológico. Plantas que receberam a aplicação de glifosato no estágio de duas folhas obtiveram 100% de controle, enquanto que nos estádios mais avançados houve redução de controle (ULGUIM et al., 2013). Quanto mais avançado o estágio de desenvolvimento do capim pédegalinha, menor a sensibilidade ao glifosato havendo a necessidade do uso de outros herbicidas em sequencial ou mistura.

O uso de herbicidas em mistura ou sequencial apresenta o intuito de aumentar a eficiência dos produtos em comparação à sua utilização isolada. Contudo, alguns agrotóxicos combinados em mistura podem ocasionar ineficiência no controle das plantas daninhas, seja por efeitos físico-químicos indesejáveis seja por efeitos biológicos adversos (FERREIRA et al. 1995; BURKE et al., 2003; BARNES & OLIVER, 2004; HAN et al., 2013; PETERSON et al., 2016).

3 | MISTURA DE HERBICIDAS

A mistura de agrotóxicos baseia-se na utilização simultânea de dois ou mais produtos, misturados em tanque, aplicados sobre a mesma área ou cultura. A regularização da mistura de tanque ocorreu através da Instrução Normativa nº 40 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, em 11 de outubro de 2018, sendo a partir de então uma prática prescrita em receita agrônômica pelo profissional habilitado. Apesar de ter sido recentemente regulamentada, estudos demonstram que a mistura de agrotóxicos no tanque do pulverizador é uma prática usualmente empregada nos mais diversos sistemas de produção agrícola do Brasil, representado 97% dos casos analisados (GAZZIERO, 2015). As misturas podem apresentar vantagens em comparação à aplicação de um único composto devido ao aumento da eficiência contra os organismos alvo e à diminuição das quantidades aplicadas, além da redução de custos (GUIMARÃES et al., 2014; GAZZIERO, 2015).

Além do uso de misturas em tanque, a aplicação de herbicidas na modalidade sequencial vem se mostrando uma alternativa interessante para o controle de plantas daninhas. Essa prática corresponde à realização de mais de uma aplicação em intervalos de tempo determinados. Tanto a mistura de tanque quanto a aplicação em sequencial apresentam o intuito de aumentar a eficiência do produto em comparação à sua utilização isolada, sendo a combinação de produtos de diferentes mecanismos de ação uma solução viável para problemas com as espécies resistentes (DAMALAS et al., 2004).

Contudo, interações entre agrotóxicos podem ocorrer antes, durante ou após a aplicação. Esses podem interagir física ou quimicamente na solução de pulverização (calda) ou biologicamente na planta (ZHANG et al., 1995). Essas interações podem gerar incompatibilidade na calda e/ou efeito sinérgico, aditivo ou antagônico na planta em relação ao efeito de cada herbicida utilizado isoladamente (COLBY, 1967).

4 | INCOMPATIBILIDADE FÍSICO-QUÍMICA EM CALDA

Pesquisas com instituições e profissionais envolvidos na produção agrícola brasileira demonstram que os principais problemas associados à incompatibilidade físico-química de agrotóxicos e afins são referentes a dificuldade em dissolver os produtos misturados, excesso de formação de espuma, formação de precipitados no tanque (GAZZIERO, 2015) e separação de fases em geral (SILVA et al., 2007). Essas consequências são decorrentes das interações físico-química entre os ingredientes aditivos dos diferentes produtos, bem como os ingredientes inertes da formulação (PETTER et al., 2013). A incompatibilidade física pode levar ao entupimento dos bicos e filtros e, conseqüentemente, perda da eficácia do produto e dificuldades durante a aplicação (GAZZIERO, 2015).

Considera-se que, principalmente, fatores como pH e dureza da água encontram-

se frequentemente associados aos problemas de incompatibilidade entre produtos na ocasião do preparo da calda (QUEIROZ et al., 2008). O pH da água quando elevado, por exemplo, pode acelerar a degradação das moléculas por hidrólise alcalina (KISSMANN, 1997); enquanto altos índices de dureza da água podem favorecer reações entre os ingredientes ativos e inertes dos agrotóxicos com os íons livres em solução, como Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} e Al^{3+} (STUMM & MORGAN, 1996).

Assim como a mistura entre agrotóxicos, a adição de adjuvantes à calda também pode ocasionar problemas de compatibilidade físico-química, redução da eficiência dos produtos (QUEIROZ et al., 2008), bem como casos de fitotoxicidade e eliminação da seletividade para algumas culturas (BOLLER et al., 2007). Geralmente, os adjuvantes são recomendados para o preparo da calda de diversos agrotóxicos, visando, principalmente, facilitar a penetração/absorção do ingrediente ativo pelas cutículas das folhas (ZIMDAHL, 2018). No entanto, sua utilização não deve ocorrer de forma indiscriminada, sendo necessária a avaliação para cada caso de forma a evitar efeitos indesejáveis, da mesma maneira que ocorre para a mistura entre agrotóxicos.

Dessa forma, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014) elaborou a denominada NBR 13875:2014, especificando a metodologia para avaliação da compatibilidade físico-química de produtos agrotóxicos e afins em calda de aplicação em campo. O procedimento é dividido em técnica estática e dinâmica, sendo realizadas avaliações visuais em tempos pré-estabelecidos de forma a avaliar a homogeneidade dos sistemas (ABNT, 2014).

Ressalta-se que a sequência de adição dos produtos à calda também é importante para avaliação da compatibilidade físico-química de agrotóxicos e afins e, conseqüentemente, evitar efeitos indesejáveis que prejudiquem a eficiência dos produtos (MARIANO & OSTROWSKI, 2007). A recomendação para o preparo da calda deve preconizar o tipo de formulação dos produtos, de forma a incluir inicialmente os produtos sólidos (grânulos dispersíveis e pós molháveis); e posteriormente, as formulações líquidas, obedecendo a sequência de adjuvantes de compatibilidade, suspensões concentradas, suspo-emulsões, emulsão óleo em água, concentrados emulsionáveis, soluções concentradas e adjuvantes (óleos, molhantes e outros) (SYGENTA, 2019). Estas informações não dispensam seguir as recomendações e limitações contidas em bulas quanto ao uso de agrotóxicos em mistura, a fim de evitar incompatibilidades. Além disso, recomenda-se uma pré-mistura para verificar reações indesejáveis (GAZZIERO, 2015).

A verificação prévia da compatibilidade físico-química dos agrotóxicos e afins nas condições específicas de aplicação, denominada “teste de jarra”, auxilia a garantir a eficiência da aplicação dos produtos, no sentido de avaliar o surgimento de reações físico-químicas indesejáveis entre produtos e/ou água no tanque (AENDA, 2019). O “Teste da Jarra” consiste em adicionar em um recipiente com água os produtos a serem pretensamente misturados, numa ordem de acordo com o tipo de formulação, deixar em repouso por 2 horas e verificar se há incompatibilidades físicas (AENDA,

2019; FIGURA 1). Caso isso ocorra, deve-se buscar meios de substituir os produtos incompatíveis ou realizar a aplicação de forma isolada. No entanto, vale destacar que, nesses casos, incompatibilidades biológicas não são reveladas por esses testes.

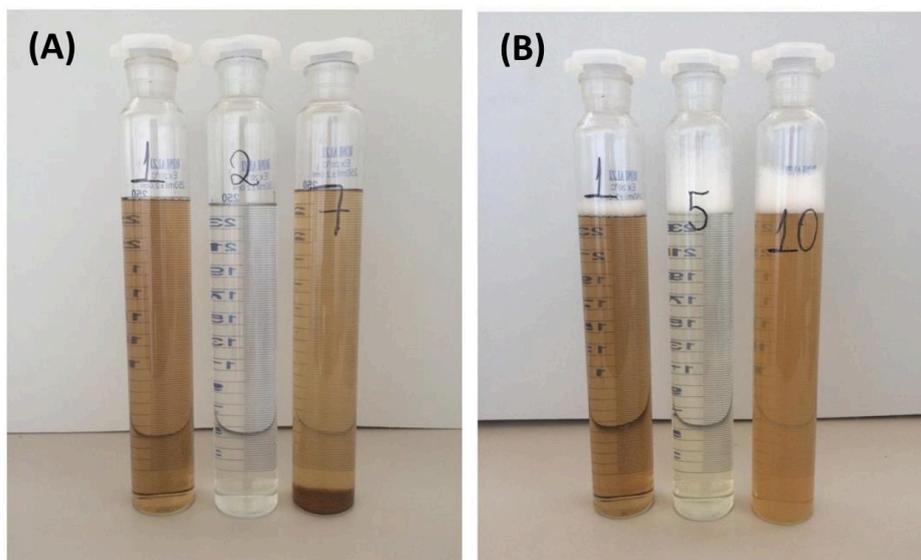


Figura 1. Análise visual de compatibilidade físico-química de misturas de herbicidas em laboratório. Figura A representa formação de precipitado e figura B formação de espuma. Seropédica, RJ. Fonte: PDPA/UFRRJ

5 | INTERAÇÃO ENTRE HERBICIDAS: EFEITO SINÉRGICO, ADITIVO OU ANTAGÔNICO

Além das preocupações relacionadas aos efeitos da incompatibilidade físico-química de mistura de agrotóxicos em tanques, outro entrave corresponde à interação desses produtos biologicamente na planta.

A interação ideal entre herbicidas seria aquela que exibe atividade aprimorada em espécies alvo de plantas daninhas e seletividade para culturas de interesse (DAMALAS et al., 2004). No entanto, esse cenário é de difícil previsão, uma vez que o comportamento de cada herbicida na mistura é muitas vezes influenciado pela presença de outro produto e até mesmo pelas características da água (STUMM; MORGAN, 1996; QUEIROZ et al., 2008), além do que a atividade da mistura também pode variar consideravelmente dependendo das espécies de plantas, do estágio fenológico e das condições ambientais (BARNES & OLIVER, 2004; VIDAL et al., 2010; BETHKE et al., 2013; UNDERWOOD et al., 2016; TREZZI et al., 2016).

A resposta da mistura de herbicidas pode ter efeito antagônico, sinérgico ou aditivo. Quando o efeito da mistura é superior ao da aplicação dos produtos individualmente, ou seja, um produto melhora a eficácia do outro, a mistura é considerada sinérgica; quando o efeito da aplicação da mistura é inferior ao da aplicação dos produtos individualmente, ou seja, um produto piora a eficácia do outro, o efeito é antagônico;

quando o efeito da aplicação da mistura é semelhante ao da aplicação dos produtos individualmente a mistura é denominada aditiva (COLBY, 1967).

Interações antagônicas entre herbicidas frequentemente causam ineficiência no controle de plantas daninhas. As interações negativas entre herbicidas em mistura podem ser atribuídas a alterações na quantidade de um herbicida que atinge seu sítio de ação através de mudanças na absorção, translocação ou metabolismo causadas pela presença do outro herbicida (MUELLER et al., 1990; BARNES & OLIVER, 2004; MATZENBACHER et al., 2015). Cerca de 80% das interações antagônicas ocorrem em espécies da família Poaceae (gramíneas) (ZHANG et al, 1995; DAMALAS et al., 2004).

Os herbicidas de contato (glufosinato, paraquat, dentre outros) destroem rapidamente tecidos foliares e prejudicam a absorção e translocação de herbicidas sistêmicos como glifosato (BETHKE et al., 2013). Isso faz com que seja comum o efeito antagônico entre esses herbicidas em mistura no controle de diversas plantas daninhas (Tabela 1). O mesmo efeito é observado para em alguns herbicidas inibidores da PROTOX quando em mistura com glifosato (Tabela 1), contudo para algumas espécies de plantas daninhas o efeito antagônico não é observado (Tabela 2) (EUBANK et al., 2013), salientando que a interação entre herbicidas é dependente da espécie, herbicida e dose.

Geralmente, efeitos antagônicos ocorrem principalmente quando o graminicida é aplicado juntamente ou após os herbicidas latifolicidas (TREZZI et al., 2007). Podendo o efeito ser contornado por intervalos entre aplicações (MATZENBACHER et al., 2015). Como observado pelo Grupo de Pesquisa Plantas Daninhas e Pesticidas no Ambiente - PDPA/UFRRJ, há existência de efeito antagônico no controle de capim-amargoso quando o herbicida 2,4-D ou cloransulam (herbicidas latifolicidas) são aplicados juntos ou antes do herbicida haloxifope-p-metílico (graminicida). Contudo, a aplicação em sequencial de haloxifope-p-metílico seguida do latifolicida (2,4-D ou cloransulam), com intervalo mínimo de seis dias entre aplicações, apresentou interação aditiva no controle de capim-amargoso, anulando o efeito antagônico observado anteriormente (PINHO et al., 2017; LEAL et al., 2018).

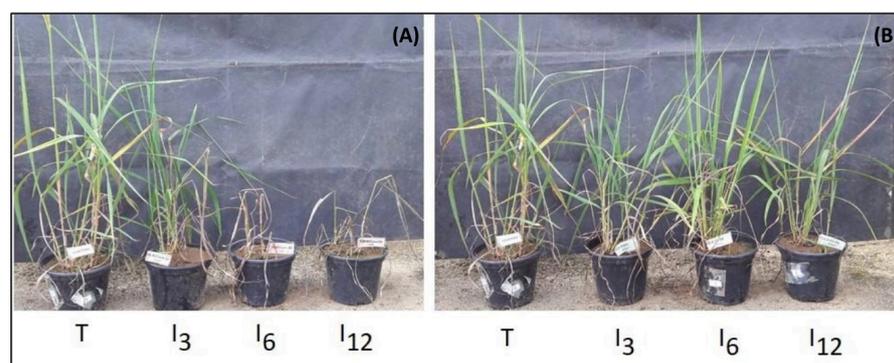


Figura 2. Vista frontal das plantas de capim-amargoso no estágio de 3-4 perfilhos aos 35 dias após a aplicação dos tratamentos, submetidas aos sequenciais dos herbicida haloxifope-

p-metílico seguido do herbicida latifolicida (A) e latifolicida seguido do haloxifope (B) com intervalos de 3, 6 e 12 dias entre as aplicações (I3, I6 e I12). Seropédica, RJ. Fonte: PDPA/UFRRJ

Já o efeito sinérgico pode auxiliar o manejo de plantas daninhas, aumentando o espectro de controle e reduzindo custos. O sinergismo pode ser frequentemente atribuído ao aumento da absorção e/ou translocação, ou à redução na taxa de metabolismo. Na maioria das vezes, o sinergismo ocorre devido à ação dos constituintes da formulação de um herbicida sobre o outro (ZHANG et al., 1995; DALAMAS, 2004).

O efeito antagônico (Tabela 1) ou sinérgico (Tabela 2) dependerá da espécie vegetal e dos herbicidas utilizados, por isso pesquisas são indispensáveis.

Interações Antagônicas		
Espécie	Herbicidas	Citação
Azevém (<i>Lolium spp.</i>)	clodinafope + 2,4-D	Han et al, 2013
	clodinafope + metsulfurom-metílico	Trezzi et al., 2007
	diclofope-metílico+2,4-D	Vidal et al., 2010
	glifosato + clomazone	
	imazetapir + clomazone	
Apaga-fogo (<i>Alternanthera tenella</i>)	saflufenacil +clomazone	Trezzi et al., 2016
Capim-amargoso (<i>Digitaria insularis</i>)	2,4-D + haloxifope-p-metílico	Leal et al., 2018
	2,4-D + cloransulam-metílico	Pereira et al., 2018 Pinho et al., 2017
Capim-arroz (<i>Echinochloa crus-galli</i>)	fenoxapropo +imazetapir +imazapique	Matzenbacher et al., 2015
	fenoxapropo + bispiribaque	Matzenbacher et al., 2015
Capim-colchão (<i>Digitaria sanguinalis</i>)	2,4-D +quizalofope-p-etílico	Abit et al., 2011
Carrapicho (<i>Acanthospermum hispidum</i>)	2,4-D + fluazifop-P-butilo	Liu et al., 2017
Caruru (<i>Amaranthus hybridus</i>) Corda-de-viola (<i>Ipomoea nil</i>)	glifosato + clomazone	Vidal et al., 2010
Ançarinha (<i>Chenopodium album</i>) Juta -da-china (<i>Abutilon Theophrasti</i>) Rabo-de-raposa (<i>Setaria fosbergii</i>)	glifosato + glufosinato de amônio	Bethke et al.,2013
Leiteiro (<i>Euphorbia heterophylla</i>)	clomazone + lactofen glifosato + imazetapir glifosato + imazetapir +clomazone	Vidal et al., 2010

Milho voluntário (<i>Zea mays</i>)	dicamba +cletodim dicamba +quizalofope	Underwood et al., 2016
Pastinho-de-inverno (<i>Poa annua</i>)	cloransulam-metílico + herbicidas do grupo ariloxifenoxipropionato (fluozirope-p-butílico, quizalofope-p-etílico e fluazifope-p-butílico + fenaxaprope-etílico)	Barnes & Oliver, 2004
Pé-de-galinha (<i>Eleusine indica</i>)	cletodim + imazapique glifosato + glufosinato de amônio glifosato+ sulfentrazone glufosinato+cletodim	Burke et al., 2003 Burke et al., 2005 Chuah et al., 2008 Vidal et al., 2016
Rabo-de-raposa (<i>Setaria glauca</i>)	fluazifop +cloransulam	Barnes e Oliver, 2004
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	glifosato+ simazine + atrazine	Vidal et al., 2003
Quebra-pedra (<i>Phyllanthus tenellus</i>)	glifosato+diquat	Wehtje et al., 2008

Tabela 1. Contextualização das interações antagônicas entre herbicidas presentes em publicações nacionais e internacionais.

Interações Sinérgicas		
Espécie	Herbicidas	Citações
Apaga-fogo (<i>Alternanthera tenella</i>)	saflufenacil + paraquat saflufenacil + metribuzin	Trezzi et al., 2016
Buva (<i>Conyza spp.</i>)	cloransulam+haloxifope glifosato+ clorimurrom glifosato+dicamba haloxifope+2,4-D saflufenacil + glifosato	Bressanin et al., 2014 Byker et al., 2013 Kruse et al., 2015 Leal et al., 2018
Capim-amargoso (<i>Digitaria insularis</i>)	glifosato + cletodim glifosato + cletodim + s-metolachlor glifosato + fenoxaprope-+cletodim glifosato + fluazifope glifosato + haloxifope glifosato + imazetapir glifosato + setoxidim glifosato + tepraloxidim	Carpejani et al., 2013 Melo et al., 2012 Pereira et al., 2018
Capim-arroz (<i>Echinochloa crus-galli</i> e <i>Echinochloa colona</i>)	fenoxaprope-etílico + etoxissulfurom	Bhullar et al., 2016
Caruru (<i>Amaranthus palmeri</i>)	quizalofope-p-etílico + 2,4-D	Abit et al., 2011

Caruru (<i>Amarantus hybridus</i>)	2,4-D+ fluazifope 2,4-D+haloxifop	Grichar et al., 1987
Ambrosia (<i>Ambrosia trifida</i>) Ançarinha (<i>Chenopodium álbum</i>) Buva (<i>Conyza</i> sp.) Caruru (<i>Amaranthus rudis</i>) Corda-de-viola (<i>Ipomoea nil</i>) Juta-da-China (<i>Abutilon heophrasti</i>) Poaia branca (<i>Richardia brasiliensis</i>) Rabo-de-raposa (<i>Setaria faberi</i>) Trapoeeraba (<i>Commelina benghalensis</i>)	glifosato + 2,4-D	Robinson et al., 2012 Osipe et al., 2017
Buva (<i>Conyza</i> sp.) Corda-de-viola (<i>Ipomoea nil</i>) Poaia branca (<i>Richardia brasiliensis</i>) Trapoeeraba (<i>Commelina benghalensis</i>)	glifosato + dicamba	Osipe et al., 2017
Malva (<i>Malva parviflora</i>)	Glifosato+ fluoroxipir	Chorbadjian et a., 2002

Tabela 2. Contextualização das interações sinérgicas entre herbicidas presentes em publicações nacionais e internacionais.

6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversos fatores devem ser considerados para realização do controle químico eficiente das plantas daninhas, tanto em relação ao preparo da calda e realização de misturas em tanque, quanto em relação ao tipo de infestação. A mistura de herbicidas e afins em tanque apresenta-se como uma alternativa viável quando realiza efeitos sinérgicos ou aditivos no controle de plantas daninhas, principalmente, nos casos de áreas com gramíneas e folhas largas, resistentes ou tolerantes a herbicidas e em estágio de desenvolvimento mais avançado. No entanto, análises prévias devem indicar a compatibilidade físico-química desses produtos na mistura, a fim de evitar problemas decorrentes de formação de espuma e precipitados, bem como separação de fases no tanque.

REFERÊNCIAS

ABIT, M. J. M.; AL-KHATIB, K.; OLSON, B. L.; STAHLMAN, P. W.; GEIER, P. W.; THOMPSON, C. R.; CURRIE, R. S.; BEAN, B. W. **Efficacy of postemergence herbicides tankmixes in aryloxyphenoxypropionate-resistant grain sorghum.** Crop Protection, v.30, p. 1623-1628, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13875. Agrotóxicos e afins - Avaliação de compatibilidade físico-química.** Rio de Janeiro, 12p., 2014.

ADEGAS, F. S.; VARGAS, L.; GAZZIERO, D. L. P.; KARAM, D.; SILVA, A.F.; AGOSTINETTO, Dirceu. **Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil.** Londrina: Embrapa Soja, 2017 (Circular Técnica).

AENDA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DEFENSIVOS GENÉRICOS. **Técnica e Controle das Misturas.** Disponível em: http://www.aenda.org.br/artigos_post/tecnica-e-controle-das-misturas. Acesso em: 01 de fevereiro de 2019.

BARNES, J. W.; OLIVER, L.R. **Cloransulam-metílico antagonizes annual grass control with aryloxyphenoxypropionate graminicides but not cyclohexanediones.** Weed Technology. v. 18, n. 3, p. 763-772, 2004.

BETHKE, R. K.; MOLIN, W. T.; SPRAGUE, C.; PENNER, D. **Evaluation of the interaction between glyphosate and glufosinate.** Weed Science, v.61, n.1, p.41-47, 2013.

BHULLAR, M. S.; KUMAR, S.; KAUR, S.; KAUR, T.; SINGH, J.; YADAV, R.; CHAUHAN, B. S.; GILL, G. **Management of complex weed flora in dry-seeded rice.** Crop Protection. V.83, p.20-26, 2016.

BLAINSKI, É.; MACIEL, C.; ZOBIOLE, L.; RUBIN, R.; SILVA, A.; KARPINSKI, R.; HELVIG, E. **Eficiência do cloransulam-metílico no controle em pós-emergência de *Conyza bonariensis* na cultura da soja RR®.** Revista Brasileira de Herbicidas. v. 14, n. 3, p. 235-242, 2015.

BOLLER, W.; FORCELINI, L. A.; HOFFMANN, L. L. **Tecnologia de aplicação de fungicidas – Parte I.** In: LUZ, W. C.; FERNANDES J. M.; PRESTES, A. M.; PICININI, E. C. (Org.). Revisão Anual de Patologia de Plantas, Passo Fundo, v.15, p.243-276, 2007.

BRESSANIN, F.; JAYME NETO, N.; MARTINS, J.; MARTINS, J. ALVES, P. **Controle de biótipos resistentes de *Conyza bonariensis* com glyphosate + clorimuron-etílico em função do estágio de desenvolvimento.** Revista Brasileira de Herbicidas, v. 13, n. 1, p. 68-72, 2014.

BURKE, I. C.; & WILCUT, J. W. **Physiological basis for antagonism of clethodim by imazapic on goosegrass (*Eleusine indica* (L.) Gaertn.** Pestic Biochem Physiol v.76, p.37–45, 2003.

BURKE, I. C.; ASKEW, S. D.; CORBETT, J. L.; WILCUT J. W. **Glufosinate antagonizes clethodim control of goosegrass (*Eleusine indica*).** Weed Technology, v.19. p.664–668, 2005.

BYKER, H. P.; SOLTANI, N.; ROBINSON, D. E.; TARDIF, F. J.; LAWTON, M. B.; SIKKEMA, P. H. **Control of glyphosate-resistant horseweed (*Conyza canadensis*) with dicamba applied preplant and postemergence in dicamba-resistant soybean.** Weed Technology, v.27, p.92-6, 2013.

CARPEJANI, M. da S.; OLIVEIRA JR, R. S. **Manejo químico de capim-amargoso resistente a glyphosate na pré-semeadura da soja.** Campo Digital, v. 8, n. 1, 2013

CHORBADJIAN, R.; KOGAN, M. **Interaction between glyphosate and fluroxypyr improve mallow control.** Crop Protection, v. 21, n. 8, p. 689-692, 2002.\

CHUAH, T. S.; TEH, H. H.; CHA, T. S.; ISMAIL, B. S. **Antagonism of glufosinate ammonium activity caused by glyphosate in the tank mixtures used for control of goosegrass (*Eleusine indica* Gaertn.).** Plant Protection Quarterly, v.23, n.3, 2008.

COLBY, S. R. **Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicides combinations.** Weed Science, v. 15, n.1, p. 20-22, 1967.

CORREIA, N. M.; DURIGAN, J. C. **Manejo químico de plantas adultas de *Digitaria insularis* (L.) Fedde com glyphosate isolado e em mistura com chlorimuronethyl ou quizalofop-p-tefuril em área de plantio direto.** *Bragantia*, p.689-697, 2009.

DAMALAS, C. A. **Review Herbicide Tank Mixtures: Common Interactions.** *International Journal of Agriculture and Biology*, v. 6, n. 1, 2004.

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

EUBANK, T. W., NANDULA, V. K., POSTON, D. H., & SHAW, D. R. **Multiple resistance of horseweed to glyphosate and paraquat and its control with paraquat and metribuzin combinations.** *Agronomy*, v. 2, n. 4, p. 358-370, 2012.

FADIN, D. A.; TORNISIELO, V. L.; BARROSO, A. A. M.; RAMOS, S.; DOS REIS, F. C.; MONQUERO, P. A. **Absorption and translocation of glyphosate in *Spermacoce verticillata* and alternative herbicide control.** *Weed Research*, v.58, n.5, p.389-396, 2018.

FERREIRA, KL; BURTON, JD; COBLE, HD **Base fisiológica para o antagonismo do fluazifop-P por DPXPE350.** *Weed Science.*, V. 43, n. 2, p. 184-191, 1995.

GALON, L.; FERREIRA, E. A.; ASPIAZÚ, I.; CONCENÇO, G.; SILVA, A.F.; SILVA, A. A.; VARGAS, L. **Glyphosate translocation in herbicide tolerant plants.** *Planta Daninha*, v.31, n.1, p.193-201, 2013.

GAZZIERO, D. L. P. **Misturas de agrotóxicos em tanque nas propriedades agrícolas do Brasil.** *Planta Daninha*, v. 33. 2015.

GAZZIERO, D.L.P. et al. **Interferência da buva em áreas cultivadas com soja.** In: XXVII Congresso brasileiro da ciência das plantas daninhas. Ribeirão Preto, SP. Anais.. p.1555-1558, 2010.

GEMELLI, A.; OLIVEIRA JUNIOR, R.; CONSTANTIN, J.; BRAZ, G.; JUMES, T.; OLIVEIRA NETO, A.; DAN, H.; BIFFE, D. **Aspectos da biologia de *Digitaria insularis* resistente ao glyphosate e implicações para seu controle.** *Revista Brasileira de Herbicidas*, v.11, n.2, p.231-240, 2012.

GRICHAR, W. J.; BOSWELL, T. E. **Herbicide combinations in peanut (*Arachis hypogaea*).** *Weed Technology*, p.290-293, 1987.

GUIMARÃES, G. L. **Principais fatores comerciais condicionantes da disponibilidade de produtos isolados e em misturas.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 29., 2014, Gramado. Palestra... Gramado: 2014.

HAN, H.; YU, Q.; CAWTHRAY, G. R.; POWLES, S. B. **Enhanced herbicide metabolism induced by 2,4-D in herbicide susceptible *Lolium rigidum* provides protection against diclofopmethyl.** *Pest Manag Sci*. p.996–1000, 2013.

HEAP I. 2019. **International survey of herbicide resistant weeds** [online]. <http://www.weedscience.org> (10 Jan 2019)

KISSMANN, K. G. **Adjuvantes para caldas de produtos agrotóxicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 21., 1997, Caxambu. Palestras e mesas redondas. Viçosa: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 1997. p. 61-77.

KRUSE, N. D.; MACHADO, S. L. O.; BALBINOT, A. **Sinergismo na combinação de glifosato e saflufenacil para o controle de buva.** *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, p. 249-256, 2015.

LIU, Z.; LI, P.; SUN, X., ZHOU, F.; YANG, C. **Fluazifop-P-butyl induced ROS generation with IAA (indole-3-acetic acid) oxidation in *Acanthospermum hispidum* D.C.** *Pesticide Biochemistry and Physiology*. v.143, p.312-318, 2017.

- MARIANI, F.; VARGAS, L.; AGOSTINETTO, D.; FRAGA, D. S.; SANTOS, F. M. D.; PIESANTI, S. R. **Resistência de biótipos de azevém ao herbicida iodosulfurom-metílico sódio e herbicidas alternativos para o controle.** Revista de la Facultad de Agronomía, p.115, 2016.
- MARIANO, J.; OSTROWISKI, A. C. **Adição de produtos fitossanitários à calda de pulverização.** Coamo, 2007.
- MATZENBACHER, F. O., KALSING, A., DALAZEN, G., MARKUS, C., & MEROTTO JR, A. **Antagonism is the predominant effect of herbicide mixtures used for imidazolinone-resistant barnyardgrass (*Echinochloa crus-galli*) control.** Planta Daninha, p 587-597, 2015.
- MELO, M.; ROSA, L.; BRUNHARO, C.; NICOLAI, M.; & CHRISTOFFOLETI, P. **Alternativas para o controle químico de capim-amargoso (*Digitaria insularis*) resistente ao glyphosate.** Revista Brasileira de Herbicidas, v. 11, n. 2, p. 195-203, 2012.
- MONQUERO P.A.; CHRISTOFFOLETI P. J. OSUNA M. D.; DE PRADO R. A. **Absorption, translocation and metabolism of glyphosate by plants tolerant and susceptible to this herbicide.** Planta Daninha, v.22, p.445–451, 2004.
- MOREIRA, M. S.; NICOLAI, M.; CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, O. J. **Resistência de *Conyza canadensis* e *C. bonariensis* ao herbicida.** Planta Daninha, v. 25, n. 1, p. 157-164, 2007.
- RA, M.; MELO, M.; CARVALHO, S.; NICOLAI, M.; CRHISTOFFOLETI, P. **Alternative herbicides to control glyphosate-resistant biotypes of *Conyza bonariensis* and *Conyza canadensis*.** Planta Daninha, v.28, p.167–175, 2010.
- MUELLER, T. C.; BARRETT, M.; WITT, W. W. **A basis for the antagonistic effect of 2,4-D on haloxyfop-methyl toxicity to johnsongrass (*Sorghum halepense*).** Weed Science, v . 38, p.103–107, 1990.
- LEAL, J. F. L.; SOUZA, A. S. ; OLIVEIRA, G. F. P. B. ; RIBEIRO, S. R. S. ; CARVALHO, G. S. ; BORELLA, J. ; PINHO, C. F. **Interação entre os herbicidas cloransulam-metílico e haloxyfop-metílico no controle de buva.** In: XXXI Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2018, RIO DE JANEIRO. DESAFIOS E SUSTENTABILIDADE NO MANEJO DE PLANTAS DANINHAS, 2018.
- OLIVEIRA JR, R. S.; INOUE, M. H. **Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas.** Biologia e manejo de plantas daninhas, p.243, 2011.
- OLIVEIRA JR, R. S.; INOUE, M. H. **Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas.** Biologia e manejo de plantas daninhas, p. 243, 2011.
- OSIPE, J. B.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; TAKANO, H. K.; BIFFE, D. F. **Spectrum of weed control with 2,4-d and dicamba herbicides associated to glyphosate or not.** Planta Daninha, v.35, e017160815. Epub 04 de setembro, 2017.
- PINHO, C. F. ; LEAL, J. F. L. ; SOUZA, A. S. ; RIBEIRO, S. R. S. ; OLIVEIRA, G. F. P. B. ; ARAUJO, A. L. S. ; CARVALHO, J. A. ; PEREIRA, C. V. L. . **Antagonism of herbicides with different mode of action for the management of *Digitaria insularis*.** In: The 26th Asian-Pacific Weed Science Society Conference, 2017, Kyoto- Japan. Weed science for people, agriculture, and nature, 2017.
- PEREIRA, G. R., ZOBIOLE, L. H. S., & ROSSI, C. V. S. **Resposta no controle de capim-amargoso a mistura de tanque de glyphosate e haloxyfop com auxinas sintéticas.** Revista Brasileira de Herbicidas, v. 17, n. 2, p. 606-1-7, 2018.
- PETERSON, M. A; MCMASTER, S. A; RIECHERS, D. E; SKELTON, J. & STAHLMAN, P. W. **2, 4-D passado, presente e futuro: uma revisão.** Weed Technology , p. 303-345, 2016.

PETTER, F. A.; SEGATE, D.; ALMEIDA, F. A.; NETO, F. A.; PACHECO, L. P. **Incompatibilidade física de misturas entre inseticidas e fungicidas**. *Comunicata Scientiae*, v.4, n.2. p. 129-138, 2013.

PITELLI, R. A. **Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas**. IPEF. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, v. v.4, p. 1-24, 1987.

QUEIROZ, A. A.; MARTINS, J. A. S.; CUNHA, J. P. A. R. **Adjuvantes e qualidade da água na aplicação de agrotóxicos**. *Bioscience Journal*, v.24, n.4, p.8-19, 2008.

ROBINSON, A. P.; SIMPSON, D. M.; JOHNSON, W. G. **Summer annual weed control with 2,4-D and glyphosate**. *Weed Technology*, v.26, n.4, p.657-660, 2012.

SANTOS, F. M.; VARGAS, L.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; MARTIN, T. N.; MARIANI, F.; SILVA, D. R. O. **Herbicidas alternativos para o controle de *Conyza sumatrensis* (Retz.) E. H. Walker resistentes aos inibidores da ALS e EPSPs**. *Ceres*, v. 62, n. 6, p. 531-538, 2015.

SILVA, J. F. et al. **Herbicidas: absorção, translocação, metabolismo, formulação e misturas**. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Eds.). *Tópicos em manejo de plantas daninhas*. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. 367 p.

STUMM, W.; MORGAN, J. J. **Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters**. 3. ed. New York: J. Wiley, 1996. 1022 p.

SYNGENTA. **Ordem de mistura de produtos**. Disponível em: <https://www.syngenta.pt/produtos/ordem-de-mistura-de-produtos>. Acesso em 01 de fevereiro de 2019.

TAKANO H. K. et al. **Efeito da adição do 2,4-D ao glyphosate para o controle de espécies de plantas daninhas de difícil controle**. *Revista Brasileira de Herbicidas* . v.12, p.1-3, 2013.

TREZZI, M. M., VIDAL, R. A., PATEL, F., MIOTTO JR, E., DEBASTIANI, F., BALBINOT JR, A. A., & MOSQUEN, R. **Impact of *Conyza bonariensis* density and establishment period on soybean grain yield, yield components and economic threshold**. *Weed research*, 55(1), 34-41, 2015

TREZZI, M. M.; DIESEL, F.; KRUSE, N. D.; XAVIER, E.; PAZUCH, D.; PAGNONCELLI JR., F.; BATISTEL, S. C. **Interactions of saflufenacil with other herbicides promoters of oxidative stress to control joyweed**. *Planta Daninha*, v.34, p.319-26, 2016.

TREZZI, M.M.; MATTEI, D.; VIDAL, R.A.; KRUSE, N.D.; GUSTMAN, M.S.; VIOLA, R.; MACHADO, A.; SILVA, H.L. **Antagonismo das associações de clodinafop-propargyl com metsulfuron-methyl e 2,4-D no controle de azevém (*Lolium multiflorum*)**. *Planta daninha*. v. 25, n. 4, p. 839-847, 2007.

ULGUIM, A. R.; VARGAS, L.; AGOSTINETTO, D.; MAGRO, T. D.; WESTENDORFF, N. R.; HOLZ, M. T. **Manejo de capim pé-de-galinha em lavouras de soja transgênica resistente ao glifosato**. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.48, n.1, p.17-24, 2013.

UNDERWOOD, M.; SOLTANI, N.; HOOKER, D.; ROBINSON, D.; VINK, J.; SWANTON, C.; SIKKEMA, P. **The Addition of Dicamba to POST Applications of Quizalofop-p-ethyl or Clethodim Antagonizes Volunteer Glyphosate-Resistant Corn Control in Dicamba-Resistant Soybean**. *Weed Technology*. V. 30, p 639-647, 2016.

VASCONCELOS, M. C. C.; SILVA, A. F. A.; LIMA, R. S. **Interferência de plantas daninhas sobre plantas cultivadas**. *Agropecuária Científica no Semi-Árido, Campina Grande-PB*, v. 8, n.1, p. 01-06, 2012.

VIDAL, R. A.; MACHRY, M.; HERNANDES, G. C.; FLECK, N. G. **Antagonismo na associação de glyphosate e triazinas**. *Planta Daninha*, v.21, n.2, p.301-306, 2003.

VIDAL, R. A.; QUEIROZ, A. D.; TREZZI, M. M.; KRUSE, N. D. **Association of glyphosate with other agrochemicals: the knowledge synthesis.** Revista Brasileira de Herbicidas, v.15, n.1, p.39-47, 2016.

VIDAL, R. A.; RAINERO, H. P.; KALSING, A.; TREZZI, M. M. **Prospección de las combinaciones de herbicidas para prevenir malezas tolerantes y resistentes al glifosato.** Planta Daninha, v.28, n.1, p.159-165, 2010.

WEHTJE, G.; ALTLAND, J. E.; GILLIAM, C. H. **Interaction of glyphosate and diquat in ready-to-use weed control products.** Weed Technology, v.22, n.3, p.472-476, 2008.

WSSA-Weed Science Society of America. **Resistance and tolerance definitions.** Weed Technol. 12:789, 1998.

ZHANG, J.; A.S. HAMILL; S.E. WEAVER. **Antagonism and synergism between herbicides: trends from previous studies.** Weed Technology. v. 9, p. 86–90, 1995.

ZIMDAHL, R. L. **Herbicide formulation.** Fundamentals of Weed Science. 5ed. Academic Press, p.501–509, 2018.

ZOBIOLE, L. H. S., KRENCHINSKI, F. H., ALBRECHT, A. J. P., PEREIRA, G., LUCIO, F. R., ROSSI, C., & DA SILVA RUBIN, R. **Controle de capim-amargoso perenizado em pleno florescimento.** Revista Brasileira de Herbicidas, v. 15, n. 2, p. 157-164, 2016.

EFEITO RESIDUAL DE HERBICIDAS PRÉ-EMERGENTES EM MILHO CULTIVADO EM SUCESSÃO A SOJA

Gledson Soares de Carvalho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Samia Rayara de Sousa Ribeiro

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Cristiano Viana André

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Felipe Sant'Ana Marinho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Mariana Araújo Alves Gomes de Souza

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Monique Macedo Alves

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

Camila Ferreira de Pinho

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ

RESUMO: Herbicidas pré-emergentes são ferramentas importantes para o controle de plantas daninhas, pois apresentam efeito residual longo ampliando o período de controle dos alvos. No entanto, quando o período residual excede o ciclo da cultura, os herbicidas podem ocasionar toxicidade aos cultivos

em sucessão, fenômeno conhecido como *carryover*. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito residual dos herbicidas flumioxazim e metribuzim na cultura do milho cultivada em sucessão a soja. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em blocos casualizados, com quatro repetições. As doses utilizadas para cada herbicida foram 1/2D, D, D+1/2, 2D. A dose recomendada (D) foi 50 e 480 g ia ha⁻¹ para flumioxazim e metribuzim, respectivamente. Após a aplicação dos herbicidas, a soja foi cultivada por 120 dias e em seguida semeou-se milho. Foram avaliadas nas plantas de milho a massa seca de parte aérea (MSPA) e de raiz (MSR) e fluorescência transiente da clorofila *a* aos 15 e 60 (DAE). Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Não se observou redução da MSPA e MSR em função do aumento da dose para ambos os herbicidas. Em relação a fluorescência transiente da clorofila *a*, verificou-se que os herbicidas não influenciaram negativamente nos índices de performance fotossintética PI_{ABS} e PI_{TOTAL} . Observou-se aumento no PI_{ABS} e PI_{TOTAL} de plantas de milho cultivadas em solo sob aplicação de metribuzim (15DAE) e flumioxazim (60DAE). Os herbicidas flumioxazim e metribuzim, quando aplicados em pré-emergência da cultura da soja, não resultam em injúrias no milho cultivado em sucessão.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea mays*, pré-

emergência, *carryover*.

ABSTRACT: Pre-emergence herbicides are important tools for weed control, since they have a long residual effect extending the period of control of the targets. However, when the residual period exceeds the crop cycle, herbicides can cause crop toxicity in succession, a phenomenon known as carryover. The objective of this work was to evaluate the residual effect of the herbicides flumioxazim and metribuzim on corn crop grown in soybean succession. The experiment was conducted in a greenhouse, in randomized blocks, with four replications. The doses used for each herbicide were 1/2D, D, D+1/2, 2D. The recommended dose (D) was 50 and 480 g ai ha⁻¹ for flumioxazim and metribuzim, respectively. After application of the herbicides, the soybean was cultivated for 120 days and then corn was sown. The dry mass of aerial part (SDR) and root (RDM) and chlorophyll a transient fluorescence at 15 and 60 (DAE) were evaluated in maize plants. The data were submitted to analysis of variance and the means were compared by the Tukey test ($p \leq 0.05$). No reduction of SDM and RDM was observed as a function of dose increase for both herbicides. In relation to transient fluorescence of chlorophyll a, herbicides were found to have no negative influence on PI_{ABS} and PI_{TOTAL} photosynthetic performance indices. It was observed an increase in PI_{ABS} and PI_{TOTAL} of maize plants cultivated in soil under application of metribuzim (15DAE) and flumioxazim (60DAE). The herbicides flumioxazim and metribuzim, when applied in pre-emergence of the soybean crop, do not result in injuries to maize grown in succession.

KEYWORDS: *Zea mays*, pre-emergence, *carryover*

1 | INTRODUÇÃO

O Brasil ocupa um papel importante na agricultura mundial, sendo um dos maiores produtores de grãos. De acordo com o último levantamento realizado pela CONAB (2019), a previsão de produção de grãos para a safra 2018/2019 está em torno de 237,3 milhões de toneladas. Entre as culturas graníferas, a soja e o milho possuem grande parcela na produção brasileira, sendo o sistema soja-milho o mais representativo.

Neste sistema de produção, é comum que ocorram problemas que afetam as culturas de interesse econômico, entre estes, a presença de plantas daninhas. Estas são todas as espécies que ocorrem em momentos e locais indesejados (VENCILL, 2012), competindo com as culturas de interesse por recursos naturais como água, luz e nutrientes, podendo causar prejuízos econômicos (OERKE, 2006; MATZRAFI et al., 2014).

Há diferentes métodos para o controle de plantas daninhas, sendo o controle químico o mais utilizado para minimizar os efeitos da competição destas espécies com as culturas, sendo este um método eficaz e prático (NORSWORTHY, 2012; FOLONI et al., 2016).

Na cultura da soja, o manejo de dessecação é baseado na utilização de herbicidas pós-emergentes não seletivos, como glifosato, por exemplo. Associado a estes, podem ser empregados herbicidas pré-emergentes, pois estes garantem o controle do fluxo de emergência das plantas daninhas por um determinado período de tempo devido suas características de residualidade, garantindo que a cultura germine e desenvolva-se livre da competição com plantas daninhas (OLIVEIRA, 2001; INOUE et al., 2011a; INOUE et al., 2012).

Quando comparado aos herbicidas posicionados em pós-emergência, pode-se afirmar que herbicidas pré-emergentes, também conhecidos por possuírem longo efeito residual, necessitam de maiores cuidados ao serem aplicados, tendo em vista que sua dinâmica é dependente de vários fatores edafoclimáticos (INOUE et al., 2011b; MANCUSO et al., 2011; SCHERER, 2017). O efeito residual é uma ótima ferramenta para o controle do banco de sementes do solo, exercendo o controle por semanas ou até mesmo meses. No entanto, como consequência, pode resultar toxicidade na cultura subsequente, sendo este efeito denominado “*carryover*” (OLIVEIRA JR, 2011). Este fenômeno irá depender das características físico-químicas da molécula do herbicida usado, dos fatores edafoclimáticos, e da espécie vegetal que será plantada subsequentemente (MANCUSO et al., 2011).

Os herbicidas metribuzim e flumioxazim são exemplos de herbicidas pré-emergentes recomendados para a cultura da soja. O metribuzim é um herbicida do grupo químico das triazinonas, que tem como mecanismo de ação a inibição do fotossistema II (PSII), impedindo a transferência de elétrons do sítio Qb da proteína D1 na cadeia transportadora de elétrons, promovendo uma série de reações que culminam na morte da planta (OLIVEIRA & BRIGHENTI, 2011; TROPALDI et al., 2015). O metribuzim possui um tempo de meia vida que pode variar 30 a 60 dias (RODRIGUES & ALMEIDA, 2011; SILVA JUNIOR et al., 2015), podendo alcançar sua meia vida em 90 dias, dependendo da condição climática (WEBSTER, 1974; SAVAGE, 1977). Já o flumioxazin pertence ao grupo das N-fenilftalimidas, o qual atua na inibição da enzima protoporfirinogênio oxidase (PROTOX), ocasionando acúmulo de protoporfirina IX, promovendo a formação de espécies reativas de oxigênio que atuam na destruição de membranas celulares causando necrose dos tecidos foliares (DUKE et al., 1994; MATSUMOTO, 2002). O flumioxazin, apresenta um tempo de meia vida de 10 a 25 dias (FERRELL et al., 2005; DAN et al., 2011). Dependendo das condições edafoclimáticas, o herbicida pode alcançar períodos superiores a 35 dias (WILCUT, 2001; ALISTER, 2008).

Trabalhos realizados mostram que o herbicida flumioxazim não afetou as culturas subsequentes, como no caso do milho (DAN et al., 2011). Cornelius (2017), observou redução de aproximadamente 10 e 2% na biomassa de culturas de cobertura como o trigo e o azevém, respectivamente, após a aplicação de flumioxazim na cultura da soja. Para o herbicida metribuzim, houve redução de 13 e 4% nas mesmas culturas. No entanto, estudos que verificam o efeito desses herbicidas na cultura do milho

são escassos. Portanto, este trabalho teve por objetivo avaliar o efeito residual dos herbicidas flumioxazim e metribuzim na cultura do milho em sucessão a soja.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em áreas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), em Seropédica/RJ, em esquema de sucessão de culturas, durante o período de setembro de 2016 a março de 2017. O delineamento experimental foi de casualização por bloco, com quatro repetições. As doses utilizadas para cada herbicida foram 1/2D, D, D+1/2, 2D, sendo a dose recomendada (D) 50 e 480 g ia ha⁻¹ para flumioxazim e metribuzim respectivamente, além do tratamento controle (sem aplicação dos herbicidas). As unidades experimentais foram constituídas por vasos de polietileno de 5 L, preenchidos com solo peneirado, previamente analisado.

A semeadura da soja Sistema Cultivance® BRS 397 cv, linhagem BRZ11-6426 cv, de ciclo de aproximadamente 120 dias, foi realizada em todos os vasos e logo após, foi realizada a aplicação dos herbicidas (sistema plante-aplique). A aplicação dos herbicidas foi realizada com um pulverizador costal pressurizado a CO₂, constituído por uma barra de 2m, contendo quatro pontas de pulverização tipo Teejet Turbo Jet 110.02 proporcionando a aplicação de 150 L ha⁻¹ de calda herbicida, observando as especificidades de bula de cada produto utilizado.

Aos 120 dias após a aplicação dos herbicidas a soja foi coletada e a cultura do milho foi semeada. Aos 15 e 60 dias após a emergência (DAE) foi realizada a análise da fluorescência transiente da clorofila *a* aos. Esta análise foi medida adaptando-se ao escuro as folhas jovens totalmente expandidas, com o auxílio de cliques foliares, durante 20 minutos para que o sistema fotossintético fosse completamente oxidado. Após esse período, utilizando-se um fluorômetro portátil HandyPEA (Hanstech, King's Lynn - Norkfolk, Reino Unido), a emissão de fluorescência foi induzida em uma área de 4mm de diâmetro da folha pela exposição da amostra a um pulso de luz saturante numa intensidade de 3.000µmol m⁻² s⁻¹(STRASSER & GOVINDJEE, 1992; VIANA, 2013). A partir da curva de emissão de fluorescência transiente obtida, os dados foram utilizados para o cálculo dos parâmetros estabelecidos pelo Teste JIP (Tabela 1) através do software Biolyzer, que conduz a uma quantificação da arquitetura e comportamento do sistema fotossintético (TSIMILLI-MICHAEL & STRASSER, 2008).

PARÂMETROS DE FLUORESCÊNCIA CALCULADOS A PARTIR DOS DADOS PRIMÁRIOS OBTIDOS

$F_v = F_M - F_0$	Fluorescência variável
F_v/F_M	Rendimento quântico máximo do PSII
V_t	Fluorescência variável relativa em um tempo "t"
V_j	Fluorescência variável relativa em relação ao nível J
V_i	Fluorescência variável relativa em relação ao nível I

$M_0 = 4(F_{300\mu s} - F_0)/(F_M - F_0)$	Declive inicial aproximado (em ms^{-1}) da fluorescência transiente $V = f(t)$
$S_s = V_j/M_0$	Área total normalizada complementar correspondente apenas a fase O-J (reflete um único volume de eventos de redução de Q_A^-)
$S_m = (Area)/(F_M - F_0)$	Área total normalizada complementar acima da curva OJIP (reflete múltiplos eventos de redução de Q_A^-)
$N = S_m/S_s$	Número total de elétrons transferidos para a cadeia de transporte de elétrons entre o tempo de 0 e t (necessário para atingir F_M)

ATIVIDADE ESPECÍFICA POR CENTRO DE REAÇÃO (RC)

$ABS/RC = M_0 (1/V_j) (1/jPo)$	Medida do tamanho aparente do sistema antena ou o fluxo de absorção por RC
$TR_0/RC = M_0 (1/V_j)$	Máxima taxa pela qual um éxciton é capturado pelo RC resultando em uma redução da plastoquinona (Q_A^-)
$ET_0/RC = M_0 (1/V_j) \Psi_0$	Re-oxidação da Q_A^- via transporte de elétrons em um RC ativo
$DI_0/RC = (ABS/RC) - (TR_0/RC)$	Razão de dissipação total de energia de excitação não capturada do total de RC, sendo a dissipação neste caso à perda de energia na forma de calor
RE_0/RC	Redução do acceptor final de elétrons no lado do acceptor de elétrons do PSI por RC

RENDIMENTOS ENERGÉTICOS OU TAXAS DE FLUXO

$\Phi P_0 = TR_0/ABS = F_v/F_M$	Rendimento quântico máximo fotoquímico
$\Phi_{E0} = ET_0/ABS$	Rendimento quântico de transporte de elétrons de Q_A^- para o intersistema de aceptores de elétrons
$\Phi_{D0} = 1 - jPo = (F_0/F_M)$	Rendimento quântico para dissipação de energia
$\Phi_{R0} = RE_0/ABS$	Rendimento quântico de transporte de elétrons de Q_A^- para o acceptor final de elétrons do PSI

EFICIÊNCIAS

$\Psi E_0 = ET_0/TR_0$	Eficiência com que um éxciton capturado no RC pode mover um elétron de Q_A^- para o intersistema de aceptores de elétrons
$\rho_0 = RE_0/TR_0$	Eficiência com que um éxciton capturado no RC pode mover um elétron dentro da cadeia de transporte de elétrons de Q_A^- para os aceptores finais de elétrons do PSI
$\delta R_0 = RE_0/ET_0$	Eficiência com que um elétron pode mover o intersistema de aceptores de elétrons reduzidos no intersistema para o acceptor final de elétrons do PSI

ÍNDICES DE DESEMPENHO

$PI_{ABS} = \frac{RC}{ABS} B \left(\frac{\Phi P_0}{10S\Phi P_0} \right) OSi \left(\frac{\Psi_0}{10\Psi_0} \right)$ $= \frac{RC}{ABS} B \frac{TR_0}{DI_0}$ $\times \frac{ET_0}{1TSET_0}$	Índice de desempenho fotossintético (conservação de energia a partir do éxciton para a redução dos aceptores de elétrons do intersistema)
$PI_{total} = PI_{ABS} BS \frac{\delta_0}{1B\delta_0}$	Índice de desempenho fotossintético total (conservação de energia a partir de éxciton para a redução de aceptores finais do PSI)

Tabela 1. Principais parâmetros do Teste JIP (Adaptado de TSIMILLI-MICHAEL & STRASSER *et al.*, 2008).

Após 60 dias da emergência das plantas de milho foi realizada a coleta para a realização das análises das variáveis biométricas de massa seca de parte aérea (MSPA) e massa seca de raiz (MSR). Para este procedimento, as amostras foram separadas e colocadas em sacos de papel, sendo submetidas a secagem em estufa com circulação forçada de ar a 65°C, até alcançar massa constante, quando foram

imediatamente pesadas em balança analítica.

Todos os dados gerados nos experimentos foram submetidos à análise da variância ($p \leq 0,05$) e sendo significativos, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se incremento na massa seca de raiz das plantas de milho em função do aumento da dose, quando cultivadas em solo com aplicação prévia de flumioxazin (Tabela 2). Já para o herbicida metribuzim, não houve diferença significativa entre todos os tratamentos (doses) avaliados. Esse aumento no acúmulo de massa em função das subdoses é denominado hormese. Estímulos em culturas são verificados em características de crescimento, como acúmulo de biomassa, altura, comprimento e área foliar (SILVA et al., 2009; WAGNER et al., 2003; SILVA et al., 2012). Em casos como esse, a presença do herbicida no solo pode levar a planta a ativar seu sistema de defesa e acelerar seu metabolismo como forma de mitigar o efeito causado pelo herbicida. Esse aumento no metabolismo vegetal pode ser responsável pelo maior crescimento e desenvolvimento das plantas, resultando em maior estatura e acúmulo de massa seca (Cedergreen et al., 2007; Calabrese & Blain, 2009).

Massa seca de raiz (MSR)		
Dose (g ia ha ⁻¹)	Herbicidas	
	Flumioxazin	Metribuzim
0	0,84b*	0,84a
½ D	2,90a	0,70a
D	2,82a	0,98a
D + ½	2,70a	0,78a
2D	1,97ab	1,03a
CV(%)	22,32	

Tabela 2. Massa seca da raiz (MSR) do milho cultivado em solo tratado em pré-emergência com os herbicidas flumioxazin e metribuzim nas doses ½ D, D, D + ½ e 2D, além do tratamento controle (sem aplicação de herbicida), 120 dias após a aplicação. Seropédica/RJ – 2017.

*Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem entre si na coluna a 5% de probabilidade pelo teste Tukey ($n=4$).

Comportamento semelhante foi observado quando avaliada a massa seca da parte aérea. Plantas de milho cultivadas em solo com aplicação prévia de flumioxazin apresentaram maior acúmulo de biomassa com o aumento da dose (Tabela 3). Esse resultado também pode estar relacionado ao efeito de hormese. Cabe-se ressaltar que o milho foi cultivado 120 dias após a aplicação dos herbicidas e dessa forma acredita-se que apenas parte da quantidade inicial aplicada estava disponível no solo, podendo ser considerada equivalente a subdoses do produto. Quando avaliada a resposta na

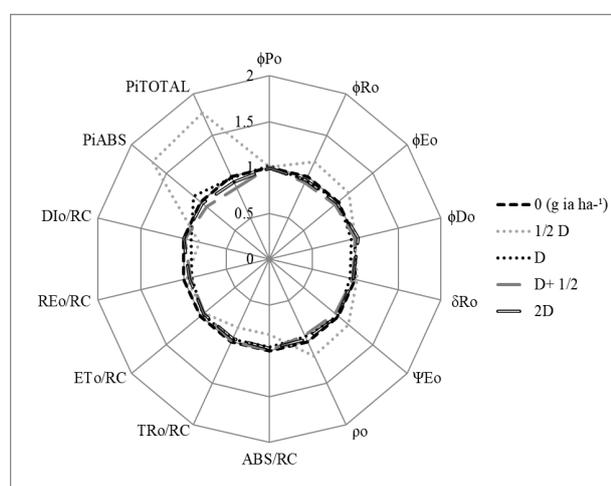
massa seca da parte aérea das plantas ao herbicida metribuzim, não se observou diferença em relação a testemunha sem aplicação.

Massa seca de parte aérea (MSPA)		
Dose (g ia ha ⁻¹)	Herbicidas	
	Flumioxazin	Metribuzim
0	2,44b [*]	2,44a
½ D	3,99ab	2,28a
D	3,14b	2,07a
D + ½	5,35a	2,13a
2D	4,31ab	3,32a
CV(%)	31,99	

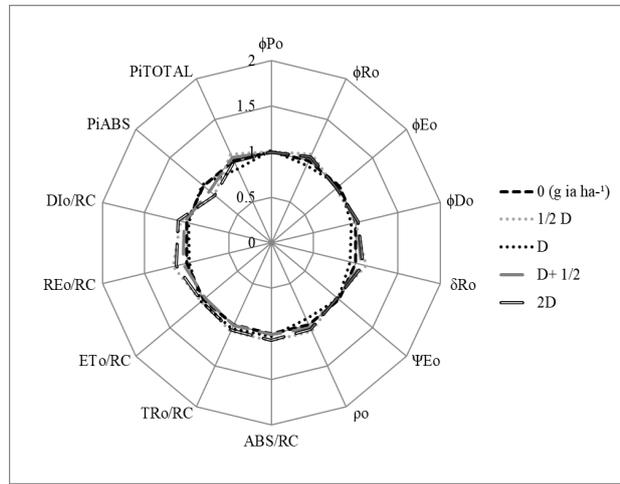
Tabela 3. Massa seca de parte aérea (MSPA) do milho cultivado em solo tratado em pré-emergência com os herbicidas flumioxazin e metribuzim nas doses ½ D, D, D + ½ e 2D, além do tratamento controle (sem aplicação de herbicida), 120 dias após a aplicação. Seropédica/RJ – 2017.

*Médias seguidas de letras minúsculas iguais não diferem entre si na coluna a 5% de probabilidade pelo teste Tukey ($n=4$).

Com relação aos dados referentes a fluorescência transiente da clorofila *a*, verificou-se que ambos os herbicidas não influenciaram negativamente nos índices de performance fotossintética PI_{ABS} e PI_{TOTAL} (Figura 1). Aos 15 DAE, não foram observadas divergências entre os parâmetros fotossintéticos das plantas de milho. Aos 60 DAE, nota-se aumento acima de 50% nos parâmetros de PI_{ABS} e PI_{TOTAL} . Este comportamento provavelmente é uma resposta da planta frente ao estresse causado pelo efeito residual do herbicida, porém não foi prejudicial ao milho tendo em vista aos valores mencionados nas tabelas 1 e 2 referentes a massa seca de raiz e de parte aérea. O aumento da performance fotossintética observada nas figuras 1B também pode estar associada ao fenômeno de hormese o qual é observado nas tabelas 2 e 3, como já discutido anteriormente, tendo como resposta o aumento de massa seca de raiz e de parte aérea.



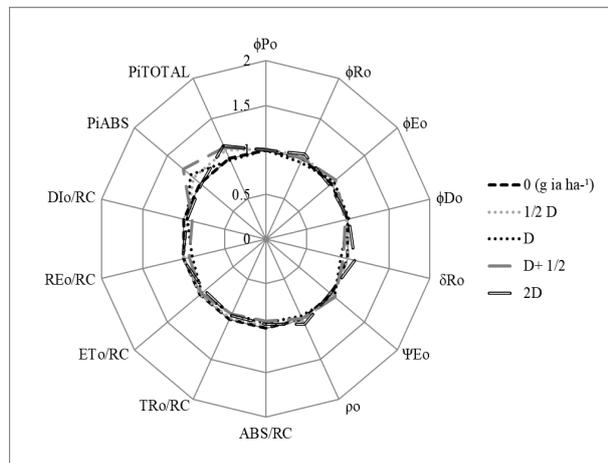
(A)



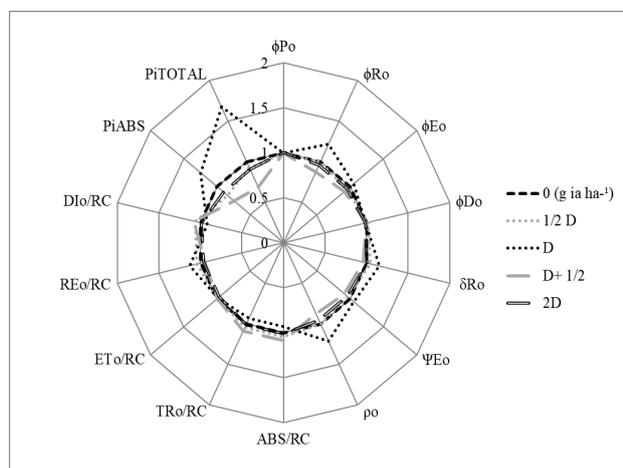
(B)

Figura 1. Fluorescência da clorofila *a* em folhas de plantas de milho sob diferentes doses de herbicidas e DAE. A-Flumioxazim 15DAE; B-Flumioxazim 60DAE.

Quando cultivadas em solo com aplicação prévia de metribuzim (figura 2), aos 15 DAE, as plantas mostraram aumento no parâmetro PI_{TOTAL} , ou seja, possivelmente houve resposta da planta em relação ao efeito residual do herbicida. Porém, aos 60 DAE, observou-se que as plantas reduziram sua atividade fotossintética em aproximadamente 50%, obtendo um comportamento do aparato fotossintético semelhante a testemunha, corroborando com os dados obtidos de massa seca de raiz e de parte aérea.



(A)



(B)

Figura 2. Fluorescência da clorofila *a* em folhas de plantas de milho sob diferentes doses de herbicidas e DAE. A- Metribuzim 15DAE; B-Metribuzim 60 DAE.

4 | CONCLUSÃO

Os herbicidas flumioxazim e metribuzim, quando aplicados em pré-emergência da cultura da soja, não resultam em injúrias no milho cultivado em sucessão 120 dias após a aplicação dos herbicidas. Desta forma, nas condições deste ensaio, os mesmos podem ser recomendados como alternativa de manejo para o sistema de rotação soja-milho.

REFERÊNCIAS

- Alister, C.; Rojas, S.; Gómez, P.; Kogan, M. **Dissipation and movement of flumioxazin in soil at four field sites in Chile**. Pest Management Science: formerly Pesticide Science, v. 64, n. 5, p. 579-583, 2008.
- CALABRESE, E. J.; BLAIN, R. B. **Hormesis and plant biology**. Environmental Pollution, v. 157, n. 1, p. 42-48, 2009.
- CEDERGREEN, N.; STREIBIG, J. C.; KUDSK, P.; MATHIASSEN, S. K.; DUKE, S. O. **The occurrence of hormesis in plants and algae**. Dose Response, v. 5, n. 2, p. 150-162, 2007.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**, Safra 2018/19 - Quarto levantamento, Brasília. p.1-126, 2019.
- CORNELIUS, C. D.; BRADLEY, K. W. **Carryover of common corn and soybean herbicides to various cover crop species**. Weed Technology, v. 31, n. 1, p. 21-31, 2017.
- Dan, H. A.; Dan, L. G. M.; Barroso, A. L. L.; Procópio, S. O.; Oliveira JR., R. S.; Assis, R. L.; SILVA, A. G.; Feldkircher, C. **Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados na cultura da soja sobre o milho cultivado em sucessão**. Planta Daninha, v. 29, n. 2, p. 437-445, 2011.
- DUKE, S. O.; NANDIHALLI, U. B.; LEE, H. J.; DUKE, M. V. **Protoporphyrinogen oxidase as the optimal herbicide site in the porphyrin pathway**. In: ACS symposium series (USA). 1994.

FERRELL, J. A.; VENCILL, W. K.; XIA, K.; GREY, T. L. **Sorption and desorption of flumioxazin to soil, clay minerals and ion-exchange resin**. Pest Management Science, v. 61, n. 1, p. 40-46, 2005.

FOLONI, L. L. **O Herbicida 2,4D I uma visão geral**. Ribeirão Preto: Labcom Total, 2016, 252 p.

INOUE, M. H.; MENDES, K. F.; SANTANA, C. T. C.; POSSAMAI, A. C. S. **Atividade residual de herbicidas pré-emergentes aplicados em solos contrastantes**. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 10, n. 3, p. 232-242, 2011a.

INOUE, M. H.; SANTANA, C. T. C.; OLIVEIRA JR., R. S.; POSSAMAI, A. C. S.; SANTANA, D. C.; ARRUDA, R. A. D.; DALLACORT, R.; SZTOLTZ, C. L. **Efeito residual de herbicidas aplicados em pré-emergência em diferentes solos**. Planta Daninha, v. 29, n. 2, p. 429-435, 2011b.

INOUE, M. H.; TSCHOPE, M. C.; MENDES, K. F.; MATOS, A. K. A.; GOULART, B. F.; BEN, R. **Seleção de bioindicadores para herbicidas residuais aplicados em pré-emergência**. Revista de Ciências Agro-Ambientais, v. 10, n. 2, p. 173-182, 2012.

MANCUSO, M. A. C.; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. **Efeito residual de herbicidas no solo ("Carryover")**. Revista Brasileira de Herbicidas, v. 10, n. 2, p. 151-164, 2011.

MATSUMOTO, Hiroshi. **Inhibitors of protoporphyrinogen oxidase: a brief update**. In: **Herbicide classes in development**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 151-161, 2002.

MATZRAFI, M.; GADRI, Y.; FRENKEL, E.; RUBIN, B.; PELEG, Z. **Evolution of herbicide resistance mechanisms in grass weeds**. Plant Science, v. 229, p. 43-52, 2014.

NORSWORTHY, J. K.; WARD, S. M.; SHAW, D. R.; LLEWELLYN, R. S.; NICHOLS, R. L.; WEBSTER, T. M.; BRADLEY, K. W.; FRISVOLD, G.; POWLES, S. B.; BURGOS, N. R.; WITT, W. W.; BARRETT, M. **Reducing the risks of herbicide resistance: best management practices and recommendations**. Weed Science, v. 60, n. SP1, p. 31-62, 2012.

OERKE, E.-C. **Crop losses to pests**. The Journal of Agricultural Science, v. 144, n. 1, p. 31-43, 2006.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. **Comportamento dos herbicidas no ambiente**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE), 2011.

OLIVEIRA, R. S.; KOSKINEN, W. C.; FERREIRA, F. A. **Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils**. Weed Research, v. 41, n. 2, p. 97-110, 2001.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S. de; CONSTANTIN, J. **Plantas daninhas e seu manejo**. Guaíba: Agropecuária, 2001.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 6.ed. Londrina: IAPAR, 2011, 697p.

SAVAGE, K. E. **Metribuzin persistence in soil**. Weed Science, v. 25, n. 1, p. 55-59, 1977.

SILVA, M. A.; ARAGÃO, N. C.; BARBOSA, M. A.; JERONIMO, E. M.; CARLIN, S. D. **Efeito hormônico de glyphosate no desenvolvimento inicial de cana-de-açúcar**. Bragantia, v. 68, n. 4, p. 973-978, 2009.

SILVA, J. C.; ARF, O.; GERLACH, G. A. X.; KURYIAMA, C. S.; RODRIGUES, R. A. F. **Efeito hormese de glyphosate em feijoeiro**. Pesquisa Agropecuária Tropical, p. 295-302, 2012.

SILVA JÚNIOR, Antonio Carlos da; QUEIROZ, Juliana Roberta Gobi; MARTINS, Dagoberto.

Quantidade de chuva e lixiviação do herbicida metribuzin através de planta bioindicadora. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 42, n. 3, p. 592-597, 2015.

SCHERER, M. B.; SPATT, L. L.; PEDROLLO, N. T.; ALMEIDA, T. C.; SANCHOTENE, D. M.; DORNELLES, S. H. B. **Herbicidas pré-emergentes para manejo de milho voluntário RR[®] na cultura da soja.** Revista Brasileira de Herbicidas, v. 16, n. 1, p. 1-10, 2017.

STRASSER, R. J.; GOVINDJEE. **The Fo and the O-J-I-P fluorescence rise in higher plants and algae.** In: Argyroudi-Akoyunoglou, J.H. (Ed.), Regulation of Chloroplast Biogenesis, p. 423-426, Plenum Press, New York, 1992.

TROPALDI, L.; VELINI, E.D.; CARBONARI, C.A.; ARALDI, R.; CORNIANI, N.; GIROTTO, M.; SILVA, I.P.F. **Detecção da tolerância de diferentes espécies de capim-colchão a herbicidas inibidores do fotossistema II utilizando a técnica da fluorescência.** Ciência Rural, v.45, n.5, p. 767-773, 2015.

TSIMILLI-MICHAEL, M.; STRASSER, R.J. **In Vivo Assessment of Stress Impact on Plants' Vitality: Applications in Detecting and Evaluating the Beneficial Role of Mycorrhization on Host Plants.** In: Varma, A. (ed) Mycorrhiza: State of the Art, Genetics and Molecular Biology, Eco-Function, Biotechnology, Eco-Physiology, Structure and Systematics, 2008, Springer, p.679-703.

VENCILL, W. K.; NICHOLS, R. L.; WEBSTER, T. M.; SOTERES, J. K.; MALLORY-SMITH, C.; BURGOS, N. R.; JOHNSON, W. G.; MCCLELLAND, M. R. **Herbicide resistance: toward an understanding of resistance development and the impact of herbicide-resistant crops.** Weed Science, v. 60, n. SP1, p. 2-30, 2012.

VIANA, D. G.; NASCIMENTO, A. F.; BELO, A. F.; PIRES, F. R.; FALQUETOS, A. R.; BONOMO, R.; TENIS, L. H. O.; ORTELANO, B. P.; TREVISAN, E. **Intensidade máxima de fluorescência e parâmetros O-J-I-P do café conilon em função de corretivos de solo e déficit hídrico.** VIII Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, 2013.

WAGNER, R.; KOGAN, M.; PARADA, A. M. **Phytotoxic activity of root absorbed glyphosate in corn seedlings (*Zea mays* L.).** Weed Biology Management, v. 3, n. 4, p. 228-232, 2003.

WEBSTER, G. R. B. **Non-biological degradation of Sencor in soil.** In: Proceedings of the annual meeting-Agricultural Pesticide Society. 1974.

WILCUT, J. W.; ASKEW, S. D.; BAILEY, W. A.; SPEARS, J. F.; ISLEIB, T. G. **Virginia market-type peanut (*Arachis hypogaea*) cultivar tolerance and yield response to flumioxazin preemergence.** Weed technology, v. 15, n. 1, p. 137-140, 2001.

EFICIÊNCIA TERAPÊUTICA DE METABÓLITOS SECUNDÁRIOS DE *ACHYROCLINE SATUREIODES*

Aline Nunes

Universidade Federal de Santa Catarina,
Laboratório de Morfogênese e Bioquímica Vegetal
Florianópolis, Santa Catarina

Caroline Schmitz

Universidade Federal de Santa Catarina,
Laboratório de Morfogênese e Bioquímica Vegetal
Florianópolis, Santa Catarina

Deise Munaro

Universidade Federal de Santa Catarina,
Laboratório de Morfogênese e Bioquímica Vegetal
Florianópolis, Santa Catarina

Marcelo Maraschin

Universidade Federal de Santa Catarina,
Laboratório de Morfogênese e Bioquímica Vegetal
Florianópolis, Santa Catarina

RESUMO: Compostos biologicamente ativos produzidos por espécies vegetais vêm sendo alvo de inúmeros estudos ao longo dos anos, devido aos seus efeitos sobre a saúde humana, tornando-se assim, uma alternativa no tratamento de doenças. Alguns compostos, em número expressivo oriundos de vias do metabolismo secundário, apresentam atividades e mecanismos de ação idênticos ou similares aos compostos farmoquímicos, permitindo assim que o uso de plantas medicinais possa ser tão eficaz quanto os medicamentos convencionais, eventualmente

com menor ocorrência de efeitos secundários. A espécie *Achyrocline satureioides*, conhecida popularmente como marcela-do-campo, é uma planta nativa do Brasil que tornou-se objeto de pesquisas por ser amplamente utilizada na medicina popular. O presente trabalho objetivou demonstrar a eficiência terapêutica de metabólitos secundários daquela espécie, através da compilação e análise de informações disponíveis em bases de dados eletrônicos e da legislação brasileira. Os resultados demonstram que a marcela-do-campo apresenta em seu metaboloma flavonoides, monoterpenos, sesquiterpenos, fenólicos, polissacarídeos, chalconas e acetilênicos com atividades farmacológicas de interesse. Esses compostos são responsáveis pela ação analgésica, anti-inflamatória, gastroprotetora, antiespasmódica, sedativa, emenagoga, calmante e outros. De interesse, ressalta-se que os dados demonstram que *Achyrocline satureioides* apresenta baixa toxicidade e em quantidades adequadas não causa efeitos nocivos à saúde. Em seu conjunto, as informações compiladas sugerem que *Achyrocline satureioides* demonstra eficiência no tratamento de diversas patofisiologias, constituindo uma alternativa terapêutica aos fármacos alopáticos em determinados quadros clínicos.

PALAVRAS-CHAVE: plantas medicinais, marcela-do-campo, fitoquímica.

THERAPEUTIC EFFICIENCY OF SECONDARY METABOLITES OF *ACHYROCLINE SATUREIODES*

ABSTRACT: Biologically active compounds extracted from plant species have been investigated over the years due to their effects on the human health, thus becoming an alternative in the treatment of certain diseases. Some compound, mostly plant secondary metabolites, have similar pharmacological activities and mechanisms of action to the chemical drug compounds, thus allowing the use of medicinal plants to be as effective as conventional drugs, further having the advantage of not causing, in most cases, harmful side effects. *Achyrocline satureioides*, popularly known as marcela-do-campo, is a Brazilian native plant object of intensive research and widely used in folk medicine. In this scenario, this study aimed to demonstrate the therapeutic efficacy of secondary metabolites of that species, by gathering and systematizing the scientific information available in public electronic data bases and also in the ongoing Brazilian legislation. The results have shown that *A. satureioides* has in its metabolome flavonoids, monoterpenes, sesquiterpenes, phenolics, polysaccharides, chalcones, and acetylene-derivative compounds of pharmacological interest. These compounds are responsible for the claimed analgesic, anti-inflammatory, gastroprotective, antispasmodic, sedative, emmenagogue, and soothing activities found in *A. satureioides* extracts. Another important finding reported in literature is that *A. satureioides* presents low toxicity and in adequate amounts does not cause harmful effects to health. Thus, *A. satureioides* has been pointed out as efficient in the treatment of several diseases and it can be thought as an alternative therapy to allopathic drugs in certain clinical frames.

KEYWORDS: medicinal plants, marcela-do-campo, phytochemistry.

1 | INTRODUÇÃO

O uso de plantas como forma de manutenção da saúde tem acompanhado a humanidade ao longo dos séculos, onde muitas espécies medicinais fazem parte das culturas étnicas nas dimensões regionais, nacionais e globais. Passado de geração em geração de modo empírico, o conhecimento tradicional associado às plantas medicinais tornou-se alvo de estudos científicos, comprovando-se, em um número expressivo de casos, o efeito terapêutico de espécies vegetais, dado ao grande número de compostos bioativos que sintetizam e acumulam (BADKE, 2016; ZAGO, 2018).

De acordo com a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), para que uma espécie seja considerada medicinal é necessário que toda a planta, ou partes desta, contenha substância ou classes de substância responsável por alguma ação terapêutica (BRASIL, 2010). A Organização Mundial da Saúde (OMS) relata que 80% da população mundial depende de plantas medicinais no processo da atenção primária em saúde, sendo que parte desta utiliza plantas como única fonte de medicamentos (LOPES, 2015).

A ampla utilização de plantas medicinais, possivelmente, deve-se ao fácil acesso

a estas, ao baixo custo em relação a fármacos convencionais e até mesmo por serem consideradas inofensivas (FONTANELLA, 2007). No Brasil, o Decreto nº 5.813 de 2006 estabeleceu a Política Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos (PNPMF), cujo objetivo principal é garantir a população brasileira o acesso seguro e o uso racional de plantas medicinais e fitoterápicos (BRASIL, 2006a). A partir daquele Decreto, a procura por plantas medicinais tem aumentado ao longo dos anos. Como exemplo, somente no Sistema Único de Saúde (SUS), relata-se que entre 2013 e 2015 essa procura apresentou um crescimento de 161% (BRASIL, 2016).

Dentre as plantas selecionadas pelo SUS para compor o Programa de Pesquisas de Plantas Medicinais (PPPM) está a espécie *Achyrocline satureioides*, conhecida popularmente como marcela ou macela-do-campo. Para tal, o PPPM relata os compostos químicos presentes na planta e suas atividades farmacológicas, possibilitando a distribuição pelo SUS (BRASIL, 2006b).

O estudo do potencial terapêutico das plantas medicinais e seus metabólitos têm sido incansável. Atualmente, os avanços em técnicas analíticas bioquímicas e espectroscópicas têm possibilitado a elucidação da estrutura química e da atividade farmacológica de um grande número de moléculas naturais. Com isso, além dos estudos para o uso terapêutico, ressalta-se a importância das espécies medicinais nas pesquisas à obtenção de novos fármacos, a partir de protótipos estruturais oriundos de plantas (YUNES, PEDROSA e FILHO, 2001).

Achyrocline satureioides é uma planta pertencente à família Asteraceae, nativa da América do Sul, distribuindo-se no Brasil desde o estado de Minas Gerais até o Rio Grande do Sul. A espécie é comumente utilizada na medicina popular, principalmente para o tratamento de problemas digestivos e inflamatórios (FACHINETTO et al., 2007; LORENZI e MATOS, 2008).

A marcela-do-campo, por ser tão utilizada, em 2002 foi instituída como planta medicinal símbolo do estado do Rio Grande do Sul (RIO GRANDE DO SUL, 2002). Inúmeros estudos retratam a importância da planta não somente naquele estado, mas em todo o Brasil. Badke et al. (2016), em pesquisa qualitativa por meio de entrevista semiestruturada sobre a utilização de plantas medicinais no Rio Grande do Sul, relata a marcela-do-campo como uma das espécies de maior frequência de citação, principalmente ao tratamento de disfunções da digestão, desarranjo, sinusite e febre. Similarmente, Colet et al. (2015) relatam uma elevada adesão de usuários, i.e. 81% (n = 446) ao tratamento de problemas de estômago, fígado, como antigripal, calmante e analgésico, a partir de extratos de *A. satureioides*.

Reconhecendo a importância da espécie, objetivou-se demonstrar a partir de revisão bibliográfica a eficiência terapêutica de *Achyrocline satureioides*, associada aos compostos biologicamente ativos presentes em seu metaboloma.

2 | MATERIAL E MÉTODOS

Para realização da pesquisa adotou-se levantamento bibliográfico em bases de dados eletrônicos, bem como o disposto na legislação brasileira. Para tal, as bases de dados Scientific Electronic Library On-line (SciELO - <https://www.scielo.org/>), Science Direct (Elsevier - <https://www.elsevier.com>), Medical Literature Analysis and Retrieval System Online (MEDLINE - <https://www.nlm.nih.gov/bsd/pmresources.html>) foram consultadas, bem como os periódicos afins ao tema, disponíveis no Portal Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES - <http://www.periodicos.capes.gov.br/>).

Para expandir os resultados da pesquisa foram utilizadas palavras-chaves em português e inglês, a saber: *Achyrocline satureioides*, marcela-do-campo, macela-do-campo, compostos biologicamente ativos (biologically active compounds), fitoterápicos (herbal medicines), plantas medicinais (medicinal plants), compostos fenólicos (phenolic compounds), Asteraceae e fitoquímica (phytochemistry).

Inicialmente, foi realizada busca extensiva de dados, seguido da seleção de informações referente ao estudo, priorizando-se pelos artigos públicos nos últimos 10 anos, onde demonstram-se os efeitos terapêuticos de *Achyrocline satureioides*, correlacionando-as com os compostos biologicamente ativos da planta.

3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Distribuição geográfica e aspectos botânicos

Achyrocline satureioides é uma espécie nativa do Brasil, presente sobretudo em ecossistemas campestres do sul e sudeste do país. É amplamente buscada durante o outono e primavera-verão para o preparo de infusões ao tratamento de distúrbios digestivos, como antiespasmódica e por suas atividades antimicrobiana e antiviral (MOTA et al., 2011; BORBA et al., 2016). De interesse, no estado do Rio Grande do Sul, as inflorescências secas da espécie são utilizadas no preenchimento de travesseiros e acolchoados (SILVA et al., 2007).

A. satureioides é uma planta herbácea anual que apresenta caule, ramos e folhas cobertos por pelos esbranquiçados. As folhas são alternas, sésseis lineares e lanceoladas. As inflorescências amarelo-dourado são reunidas em panículas corimbosas, hermafroditas e em número de uma ou duas. As flores marginais apresentam-se em quatro ou cinco. O fruto é do tipo aquênio, glabro e pardo. Trata-se de uma planta invasora encontrada comumente em terrenos baldios e pastos (CASTRO e CHEMALE, 1995; PRUSKI, 1997; LORENZI, 2000).

3.2 Compostos biologicamente ativos e eficiência terapêutica

O potencial da marcela está relacionado às substâncias encontradas em seus

extratos, notadamente aqueles pertencentes às classes dos terpenos (monoterpenos e sesquiterpenos), alcalóides, flavonóides (quercetina, luteolina e flavonol) e ácidos fenólicos (ácido caféico, ácido clorogênico, ácido isoclorogênico e ácido protocatecuico) (FACHINETTO et al., 2007; GONÇALVES et al., 2018). As partes aéreas de *A. satureioides* contêm óleo essencial rica nos monoterpenos alfa e beta-pineno (BARATA et al., 2009; MACIEL et al., 2017; GONÇALVES et al., 2018). Adicionalmente, Cavalcante (2009) descreve a presença de ésteres de caleriana, saponinas, taninos e lactonas em extratos de *A. satureioides*.

Estudos descrevem numerosos efeitos terapêuticos resultantes do uso de *A. satureioides*. Silva et al. (2016) apontam que o extrato hidroalcoólico de suas inflorescências apresenta atividade anti-inflamatória em doença intestinal, reduzindo a migração de neutrófilos à região lesada e a ativação de macrófagos e, conseqüentemente, contribuindo à diminuição do dano oxidativo. Para além da ação anti-inflamatória, têm sido relatadas as atividades citoprotetora e antioxidante no organismo humano (BOTH et al., 2016; SOUZA et al., 2018), bem como os efeitos analgésico, relaxante muscular do trato gastrointestinal, antitumoral, antiviral, antiespasmódico e sedativo (SIMÕES et al., 1998; MARQUES e BARROS, 2001; SABINI et al., 2012).

O conjunto de informações disponível na literatura científica e acumulada nas últimas décadas sugere um inequívoco potencial terapêutico de *A. satureioides*. De fato, reconhecer e validar cientificamente o efeito terapêutico de espécies com alegada ação medicinal, no âmbito de uma dada população, possibilita que esta faça uso seguro daquele recurso genético no tratamento de determinadas patofisiologias. Ressalta-se que *A. satureioides* é objeto de estudo farmacológico desde os anos 80, e não demonstra efeitos tóxicos colaterais relevantes ao organismo (LORENZI e MATOS, 2008). Neste contexto, a Tabela 1 apresenta o efeito terapêutico observado em diversos tipos de extratos de *A. satureioides*, associado aos constituintes ativos presentes no metaboloma daquela espécie.

Efeito terapêutico	Tipo de Extrato/ Obtenção	Constituintes ativos
Antihiperlipicêmico	Extrato etanólico ¹	Achyrofurano ¹
Anti-inflamatório	Extratos hidroalcoólico ² e aquoso ³	Quercetina ^{2,3} Luteolina ^{2,3}
Antimicrobiano	Extrato liofilizado ⁴	Fluoroglicinol ⁵
Antineoplásico		Quercetina ⁶ Luteolina ⁶
Antioxidante		Ácido caféico ⁷ Ácido clorogênico ⁷ Ácido isoclorogênico ⁷
Anti-Trypanosoma	Extrato etanólico ⁸	

Antiúlcera gástrica	Extrato etanólico ⁹	Terpenoides e flavonoides ⁹
Citoprotetor	Hidrólise ácida das infusões ¹⁰	Quercetina ¹⁰ Luteolina ¹⁰
Estimulatório da proliferação de queratinócitos	Extrato etanólico ¹¹	
Hepatoprotetor	Extrato aquoso ¹²	Ácido caféico ¹² Ácido protocatecuico ¹²
Hipocolesterolêmico	Extrato aquoso ¹³ Molécula isolada ¹	Benzofuranos ¹
Imunomodulador	Extrato aquoso ¹⁴	Quercetina ¹⁴
Miorrelaxante	Extrato etanólico ¹⁵	Quercitina ¹⁵ Polissacarídeos ¹⁴
Vaso dilatador	Extrato etanólico ¹⁵	Quercetina ¹⁵

Tabela 1. Descrição do efeito terapêutico de *Achyrocline satureioides* associado ao tipo de extrato e aos constituintes ativos presentes em seu metaboloma.

Fonte: ¹CARNEY et al., 2002; ²SONAGLIO et al., 1986; ³SOUZA et al., 2007; ⁴MORESCO et al., 2017; ⁵CASERO et al., 2014; ⁶CARINI et al., 2014; ⁷SIMÕES et al., 1988; ⁸BALDISSERA et al., 2014; ⁹SANTIN et al., 2010; ¹⁰ARREDONDO et al., 2004; ¹¹ALERICO et al., 2015; ¹²KADARIAN et al., 2002; ¹³ESPINA et al., 2012; ¹⁴COSENTINO et al., 2008; ¹⁵HNATYSZYN et al., 2004.

Além dos efeitos terapêuticos e dos metabólitos bioativos descritos na Tabela 1, pesquisas têm ampliado o repertório de possibilidades de uso da espécie em tratamentos de patofisiologias, porém sem o isolamento de um dado composto. Como exemplo, Santin et al. (2014), investigando o efeito gastroprotetor de uma fração rica de flavonóides de *A. satureioides*, relatam que esta estimula a secreção de muco, promovendo assim a ação protetora das células da mucosa estomacal. Carmo et al. (2015), em estudo com o óleo essencial de *A. satureioides* nas formas livre e nanoencapsulada demonstraram que esta última não evidenciou toxicidade hepática, quando do tratamento de ratos infectados com *Trypanosoma evansi*. De forma similar, Ritter et al. (2017) reportam que a utilização de nanocápsulas carregadas de óleo essencial de marcela-do-campo previne dano citotóxico hepático causado por *T. evansi*, sendo esse efeito protetor relacionado às propriedades antioxidantes de metabólitos secundários constituintes da fração óleo essencial. Por sua vez, extratos hidroalcoólicos de marcela-do-campo evidenciaram ação inibitória da replicação do vírus Herpes Simples tipo-1 (HSV), nas formas livre e nanoemulsionada (Bidone et al., 2015), sendo superior nesta última. Heizen e Dajas (2003) demonstram que o extrato de *A. satureioides* apresenta efeito neuroprotetor, contribuindo à prevenção e na terapia da isquemia vascular, de doenças neurodegenerativas e de lesões cerebrais resultantes do envelhecimento.

A atividade antitumoral de extrato hidroetanólico e de flavonoides isolados (quercetina, 3-*O*-metilquercetina, luteolina e achyrobichalcona) de *A. satureioides* foi recentemente demonstrada em modelos *in vitro* e *in vivo* de glioblastoma por Souza

et al. (2018).

No que tange à atividade antimicrobiana, Maciel et al. (2017) identificaram compostos fenólicos, como taninos hidrolisáveis e condensados, flavonóis e saponinas, em extrato bruto de *A. satureioides* com ação inibidora do crescimento de cepas de *Salmonella* spp. resistentes a antibióticos. Por sua vez, Demo et al. (2005) demonstram que o óleo essencial da marcela inibe o crescimento de *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Micrococcus luteus*, *Enterococcus faecalis* e *Proteus mirabilis*, comprovando a atividade antibacteriana daquela fração apolar.

Pesquisas anteriores com os extratos da planta inteira demonstraram a riqueza da atividade biológica desta espécie. Resultados mostram que o potencial de resposta é semelhante ao efeito de um fármaco para tratamento de diabetes do tipo 2, havendo significativa redução glicêmica (CARNEY et al., 2002) e ainda ação antimicrobiana (ROCHA et al., 1994). Por fim, Campos et al. (2016) relatam a atividade antifúngica do extrato hidroalcoólico de *A. satureioides*, em estudos sobre a redução da densidade da população e inativação total de inóculos de *Candida* spp, sugerindo o potencial de uso daquele extrato em procedimentos de desinfecção e assepsia. Da mesma forma, Vogt et al. (2010) apresentam que o extrato aquoso da *A. satureioides* possui potencial antifúngico em diferentes agentes, tais como, *Fusarium graminearum*, *Fusarium verticillioides* e *Sclerotium rolfsii*, podendo ser utilizado até mesmo na agricultura como fungicida natural.

4 | CONCLUSÃO

Achyrocline satureioides apresenta diversos metabólitos secundários bioativos, aos quais são atribuídas importantes atividades farmacológicas, algumas com comprovação científica. No entanto, a maioria das pesquisas foca no uso de extratos brutos desta planta, não inferindo a correlação da ação terapêutica eventualmente observada a uma classe de moléculas específicas, ou mesmo a dado composto. Deste modo, mais estudos são necessários à elucidação dos efeitos terapêuticos tipicamente associados àquela espécie e sua relação com um ou mais compostos isolados, haja vista a possibilidade de efeitos sinérgicos quando estes encontram-se nos extratos brutos utilizados nos estudos de bioatividade.

REFERÊNCIAS

ALERICO, G. C. et al. Proliferative effect of plants used for wound healing in Rio Grande do Sul state, Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 176, p. 305-310, 2015.

ARREDONDO, M. F. et al. Cytoprotection by *Achyrocline satureioides* (LAM) D.C. and some of its main flavonoids against oxidative stress. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 91, n. 1, p. 13-20, 2004.

BADKE, M. R. et al. Saber popular: uso de plantas medicinais como forma terapêutica no cuidado a saúde. **Revista de Enfermagem da UFSM**, v. 6, n. 2, p. 225-234, 2016.

- BALDISSERA, M. D. et al. In vitro Trypanocidal activity of macela (*Achyrocline satureioides*) extracts against *Trypanosoma evansi*. **The Korean Journal of Parasitology**, v. 52, n. 3, p. 311, 2014.
- BARATA, L. E. S. et al. Plantas medicinais brasileiras. I. *Achyrocline satureioides* (Lam.) DC. (Macela). **Revista Fitos**, v. 4, n. 1, p. 120-125, 2009.
- BIANCHI, S. E.; KAISER, S.; PITTOL, V.; DONEDA, E.; SOUZA, K. C. B.; BASSANI, V. L. Semi-preparative isolation and purification of phenolic compounds from *Achyrocline satureioides* (Lam) D.C. by high-performance counter-current chromatography. **Phytochemical Analysis**, v. 30, n. 2, p. 182-192, 2018.
- BIDONE, J. et al. Antiherpes activity and skin/mucosa distribution of flavonoids from *Achyrocline satureioides* extract incorporated into topical nanoemulsions. **BioMed Research International**, v. 2015, p. 1-7, 2015.
- BOTH, J. M. C. et al. Atividade desinfetante anti-*Staphylococcus aureus* metilicina resistentes e compostos flavonóides em *Achyrocline satureioides* Lam. (macela). **Revista Cubana de Plantas Medicinales**, v. 21, n. 4, p. 1-13, 2016.
- BRASIL. A. **Decreto nº 5.813, de 22 de junho de 2006**. Aprova a Política Nacional de Plantas Medicinais e Fitoterápicos e dá outras providências. Brasília, 2006.
- BRASIL. B. **A fitoterapia no SUS e o Programa de Pesquisa de Plantas Medicinais da Central de Medicamentos**. Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Assistência Farmacêutica. – Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 148 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde: Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução – RDC nº 10, de 09 de março de 2010**. Dispõe sobre a notificação de drogas vegetais junto à Agência Nacional de Vigilância Sanitária (**ANVISA**) e dá outras providências. Brasília, 2010.
- BRASIL. Ministério da Saúde: **Uso de fitoterápicos e plantas medicinais cresce no SUS. 2016**. Disponível em <<http://portalms.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/24205-uso-de-fitoterapicos-e-plantas-medicinais-cresce-no-sus>>. Acesso em: 10. jan. 2018.
- CAMPOS, F. L. et al. Atividade desinfetante do extrato hidroalcoólico bruto de *Achyrocline satureioides* (Asteraceae) sobre *Candida* spp. isoladas em situações-problema de mastite bovina. **Acta Veterinaria Brasilica**, v. 10, n. 4, p. 327-333, 2016.
- CARINI, J. P. et al. Flavonoids from *Achyrocline satureioides*: promising biomolecules for anticancer therapy. **Royal Society of Chemistry**, v. 4, p. 3131-3144, 2014.
- CARMO, G. M. et al. Effect of the treatment with *Achyrocline satureioides* (free and nanocapsules essential oil) and diminazene aceturate on hematological and biochemical parameters in rats infected by *Trypanosoma evansi*. **Experimental Parasitology**, v. 149, p. 39–46, 2015.
- CARNEY, J. R. et al. Achyrofuran, a new antihyperglycemic dibenzofuran from the South American medicinal plant *Achyrocline satureioides*. **Journal of Natural Products**, v. 65, n. 2, p. 203-205, 2002.
- CASERO, C. et al. Structure and antimicrobial activity of phloroglucinol derivatives from *Achyrocline satureioides*. **Journal of Natural Products**, v. 78, n. 1, p. 93-102, 2014.
- CASTRO, L. O.; CHEMALE, V. M. **Manual de identificação e cultivo de plantas medicinais, condimentares e aromáticas**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agronômicas, 1995. 78p.
- CAVALCANTE, R. **Fitodontologia**. 1 ed. São Paulo: Câmara Brasileira do Livro, 2009. 189p.
- COLET, C. R. et al. Uso de plantas medicinais por usuários do serviço público de saúde do município de Ijuí/RS. **Revista Brasileira de Medicina de Família e Comunidade**, v. 10, n. 36, p. 1-13, 2015.

COSENTINO, M. et al. Immunomodulatory properties of *Achyrocline satureioides* (Lam.) DC infusion: a study on human leukocytes. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 116, n. 3, p. 501-507, 2008.

DEMO, M. et al. Antimicrobial activity of essential oils obtained from aromatic plants of Argentina. **Pharmaceutical Biology**, v. 43, n. 2, p. 129-134, 2005.

ESPIÑA, D. C. et al. A more accurate profile of *Achyrocline satureioides* hypocholesterolemic activity. **Cell Biochemistry and Function**, v. 30, n. 4, p. 347-353, 2012.

FACHINETTO, J. M. et al. Efeito anti-proliferativo das infusões de *Achyrocline satureioides* DC (Asteraceae) sobre o ciclo celular de *Allium cepa*. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 17, n. 1, p. 49-54, 2007.

FONTANELLA, F. et al. Conhecimento, acesso e aceitação das práticas integrativas e complementares em saúde por uma comunidade usuária do Sistema Único de Saúde na cidade de Tubarão – SC. **Arquivos Catarinenses de Medicina**, v. 36, n. 2, p. 69-74, 2007.

GONÇALVES, G. et al. *Achyrocline satureioides* (Lam.) DC. **Medicinal and Aromatic Plants of South America**, v. 5, p. 81-88, 2018.

HEIZEN, H.; DAJAS, F. **Utilization of *Achyrocline satureioides* (marcela) extracts and liposomal preparations of natural and semi-synthetic flavonoids for the prevention and treatment of the consequences of stroke and neurodegenerative diseases**. U.S. Patent application 10/190440. Protocolo nº 2003055103-A, Estados Unidos da América, 20/03/2003.

HNATYSZYN, O. et al. Flavonoids from *Achyrocline satureioides* with relaxant effects on the smooth muscle of Guinea pig corpus cavernosum. **Phytomedicine**, v. 11, n. 4, p. 366-369, 2004.

KADARIAN, C. et al. Hepatoprotective activity of *Achyrocline satureioides* (Lam) DC. **Pharmacological Research**, v. 45, n. 1, p. 57-61, 2002.

LOPES, M. A. et al. Estudo das plantas medicinais, utilizadas pelos pacientes atendidos no programa “Estratégia saúde da família” em Maringá/PR/Brasil. **Revista Brasileira de Plantas Medicinais**, v. 17, n. 4, p. 702-706, 2015.

LORENZI, H. **Plantas Daninhas do Brasil**. 3ª ed. Nova Odessa Ltda: Ed. Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2000.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. **Plantas Medicinais no Brasil: nativas e exóticas**. 2ª ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2008. 576 p.

MACIEL, M. J. et al. fitoquímicos e atividade antibacteriana do extrato hidroalcoólico bruto de *Achyrocline satureioides* (“macela”) frente *Salmonella* spp. resistentes a antibióticos isoladas em produtos de origem animal (suínos e aves). **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 11, n. 3, p. 273-287, 2017.

MARQUES, F. C.; BARROS, I. B. I. Crescimento inicial de marcela (*Achyrocline satureioides*) em ambiente protegido. **Ciência Rural**, v. 31, n. 3, p. 517-518, 2001.

MORESCO, K. S. et al. Effects of *Achyrocline satureioides* Inflorescence Extracts against Pathogenic Intestinal Bacteria: Chemical Characterization, In Vitro Tests, and In Vivo Evaluation. **Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2017, p. 1-10, 2017.

PRUSKI, J. F. **Asteraceae**. In: Flora of the Venezuelan Guyana. Eds. Steyemark, J.A; Berry, P.E.; Yatskievych, K. & Holst, B.K. The Missouri Botanical Garden Press, St. Louis, v. 3, p. 200, 1997.

RIO GRANDE DO SUL. **Lei nº 11.858, de 5 de dezembro de 2002**. Institui a Planta Medicinal Símbolo do Estado do Rio Grande do Sul e dá outras providências. Porto Alegre, 2002.

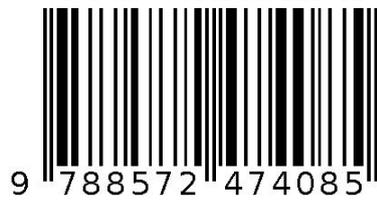
- RITTER, C. S. et al. *Achyrocline satureioides* essential oil-loaded in nanocapsules reduces cytotoxic damage in liver of rats infected by *Trypanosoma evansi*. **Microbial Pathogenesis**, v. 103, p. 149-154, 2017.
- ROCHA, M. J. A. et al. Effects of hydroalcoholic extracts of *Portulaca pilosa* and *Achyrocline satureioides* on urinary sodium and potassium excretion. **Journal of Ethnopharmacology** v. 43, p. 179-183, 1994.
- SABINI, M. C. et al. Evaluation of antiviral activity of aqueous extracts from *Achyrocline satureioides* against Western equine encephalitis virus. **Natural Product Research**, v. 26, n. 5, p. 405-415, 2012.
- SANTIN, J. R. et al. Antiulcer effects of *Achyrocline satureioides* (Lam.) DC (Asteraceae)(Marcela), a folk medicine plant, in different experimental models. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 130, n. 2, p. 334-339, 2010.
- SANTIN, J. R. et al. Gastro protective and anti-helicobacter pylorieffects of a flavonoid rich fraction obtained from *Achyrocline satureioides* (LAM) D.C. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 6, n. 7, 417-422, 2014.
- SILVA, L. M. et al. Hydroalcoholic Extract from Inflorescences of *Achyrocline satureioides* (Compositae) Ameliorates Dextran Sulphate Sodium-Induced Colitis in Mice by Attenuation in the Production of Inflammatory Cytokines and Oxidative Mediators. **Evidence-based Complementary and Alternative Medicine**, v. 2016, p. 1-15, 2016.
- SILVA, R. E. et al. Espécies de “macela” utilizadas como medicinais no Rio Grande do Sul. **Pesquisas, Botânica**, n. 58, p. 395-406, 2007.
- SIMÕES, C. M. et al. Pharmacological investigations on *Achyrocline satureioides* (Lam.) D.C. Compositae. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 22, n. 3, p. 281-293, 1988.
- SONAGLIO, D. et al. Padronização de extratos hidroalcoólicos de *Achyrocline satureioides* (Lam) DC. **Caderno de Farmácia**, v.2, n.1, p.55-74, 1986.
- SOUZA, K. C. et al. Influence of excipients and technological process on anti-inflammatory activity of quercetin and *Achyrocline satureioides* (Lam.) D.C. extracts by oral route. **Phytomedicine**, v. 14, n. 2-3, p. 102-108, 2007.
- SOUZA, P. O. et al. Anticancer activity of flavonoids isolated from *Achyrocline satureioides* in gliomas cell lines. **Toxicology in Vitro**, v. 51, p. 23-33, 2018.
- VOGT, V. et al. Fungitoxic effects of *Achyrocline satureioides* (marcela) on plant pathogens. **Molecular Medicinal Chemistry**, v. 21, p. 109-112, 2010.
- YUNES, R. A. et al. Fármacos e fitoterápicos: a necessidade do desenvolvimento da indústria de fitoterápicos e fitofármacos no Brasil. **Química Nova**, v. 24, n. 1, p. 147-152, 2001.
- ZAGO, L. M. S. Vinte e dois anos de pesquisa sobre plantas medicinais: uma análise cienciométrica. **Tecnia**, v. 3, n. 1, p. 157-173, 2018.

SOBRE OS ORGANIZADORES

CARLOS ANTÔNIO DOS SANTOS Engenheiro-agrônomo formado pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), Seropédica, RJ; Especialista em Educação Profissional e Tecnológica pela Faculdade de Educação São Luís, Jaboticabal, SP; Mestre em Fitotecnia pela UFRRJ. Atualmente é Doutorando em Fitotecnia na mesma instituição e desenvolve trabalhos com ênfase nos seguintes temas: Produção Vegetal, Horticultura, Manejo de Doenças de Plantas. E-mail para contato: carlosantoniokds@gmail.com

JÚLIO CÉSAR RIBEIRO Técnico Agrícola (Escola Técnica Limassis - Fundação Roge/2004); Engenheiro-agrônomo (Universidade de Taubaté - UNITAU/2011), Mestre em Tecnologia Ambiental (Universidade Federal Fluminense - UFF/2015); Doutor em Agronomia - Ciência do Solo (Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ/2019). Atualmente é Pós-Doutorando no Laboratório de Estudos das Relações Solo-Planta no Departamento de Solos da UFRRJ. Possui experiência na área de Agronomia - Ciência do Solo, com ênfase em ciclagem de nutrientes, nutrição mineral de plantas, fertilidade, química e poluição do solo, manejo e conservação do solo, e tecnologia ambiental voltado para ao aproveitamento de resíduos da indústria de energia na agricultura. E-mail para contato: jcragronomo@gmail.com

Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-7247-408-5



9 788572 474085