

TIAGO GAZOLA

**EFEITO DA PALHA DE MILHO NA EMERGÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS E
NA DINÂMICA E AÇÃO RESIDUAL DE 2,4-D E DICAMBA**

Botucatu

2021

TIAGO GAZOLA

**EFEITO DA PALHA DE MILHO NA EMERGÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS E
NA DINÂMICA E AÇÃO RESIDUAL DE 2,4-D E DICAMBA**

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

Orientador: Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini

Botucatu

2021

G291e Gazola, Tiago
Efeito da palha de milho na emergência de plantas daninhas
e na dinâmica e ação residual de 2,4-D e dicamba / Tiago
Gazola. -- Botucatu, 2021
111 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu
Orientador: Edivaldo Domingues Velini

1. Proteção de plantas. 2. Herbicidas. 3. 2,4-D. 4. Dicamba.
5. Palha. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: EFEITO DA PALHA DE MILHO NA EMERGÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS
E NA DINÂMICA E AÇÃO RESIDUAL DE 2,4-D E DICAMBA

AUTOR: TIAGO GAZOLA

ORIENTADOR: EDIVALDO DOMINGUES VELINI

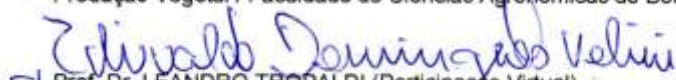
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (PROTEÇÃO
DE PLANTAS), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. EDIVALDO DOMINGUES VELINI (Participação Virtual)
Proteção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



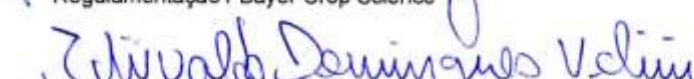
Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP



Prof. Dr. LEANDRO TROPALDI (Participação Virtual)
Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas de Dracena - UNESP



Pesquisador Dr. GILMAR JOSÉ PICOLI JUNIOR (Participação Virtual)
Regulamentação / Bayer Crop Science



Prof. Dr. LEONARDO BIANCO DE CARVALHO (Participação Virtual)
Ciências da Produção Agrícola (Fitossanidade) / FCAV / UNESP – Jaboticabal

Botucatu, 28 de maio de 2021

AGRADECIMENTOS

A Deus, Jesus Cristo e Nossa Senhora Aparecida por me guiarem e me iluminarem.

Aos meus queridos pais Sérgio e Rosa, irmã Tamires e namorada Veridiana pelo apoio total, essenciais nessa conquista.

Ao Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, pela orientação, ensinamentos, paciência e pela confiança em mim depositada.

Ao Prof. Dr. Caio Antonio Carbonari pelos ensinamentos, disponibilidade e atenção dedicados.

Ao Departamento de Proteção Vegetal e Conselho do Programa de Pós-graduação em Agronomia (Proteção de Plantas) da Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu – UNESP, pela oportunidade e formação.

Aos estagiários Allan Akio Kubo, José Tomba Neto, Matheus de Noronha Lima, Lucas Vinicius Camargo Leite da Silva, Bianca Ferreira Jordan, Vinicius Marietto Bertelli Maeji e Wallas Mendes por todo o trabalho dedicado na realização dos experimentos.

A todos os colegas do Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (Nupam), em especial ao Diego Munhoz Gomes, José Guilherme Ferreira Cordeiro, José Roberto Marques da Silva e Luiz Marcelo Siono pelo convívio, aprendizado e colaborações nas atividades realizadas.

Aos pesquisadores Romulo Ramos da BASF e Lucas Perim da Corteva Agriscience, que gentilmente concederam as amostras dos herbicidas utilizados nessa pesquisa.

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

“No que diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita ou não faz.”

“Seja quem você for, seja qualquer posição que você tenha na vida, no nível altíssimo ou mais baixo social, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá.

De alguma maneira você chega lá.”

(Ayrton Senna)

RESUMO

A soja e o milho são culturas de grande importância para a economia agrícola mundial. No Brasil, o sistema de plantio direto é amplamente utilizado e tem como principal modalidade de cultivo a sucessão de culturas com soja e milho. Entretanto, ao longo dos anos muitas espécies de plantas daninhas resistentes foram selecionadas devido ao uso contínuo de alguns herbicidas, principalmente o glyphosate, gerando impactos negativos no manejo. Devido a limitação de moléculas disponíveis para manejar essas plantas de forma eficaz e seletiva nessas culturas, o uso de variedades tolerantes a herbicidas já comercializados tem sido cada vez mais presente, como é o caso do sistema Enlist™ da Corteva e a plataforma Xtend® da Bayer. Contudo, faltam estudos que exporem melhor o potencial agrônomo dessas novas tecnologias. Para isso, foram conduzidos três estudos entre os anos de 2019 e 2020, em casa de vegetação e laboratório, para confirmar a hipótese de que os herbicidas 2,4-D e dicamba possuem ação residual de controle em plantas daninhas e que a presença da palha de milho no sistema pode suprimir o desenvolvimento dessas plantas e também interferir na ação residual desses herbicidas. Os objetivos foram I) - avaliar a influência da palha de milho no processo de emergência e crescimento de *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*, II) - avaliar a dinâmica de 2,4-D sal de colina e dicamba sal de diglicolamina (DGA) na palha de milho e III) – avaliar o efeito residual de controle nessas espécies considerando a presença e ausência da palha e o regime de chuvas. Para os experimentos de emergência e crescimento, utilizou-se como estruturas reprodutivas as sementes das espécies que foram semeadas em solo na presença e ausência de 5 t ha⁻¹ de palha de milho. Avaliou-se o número de plantas (NP) aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura (DAS) e a massa seca da parte aérea (MSPA) aos 21 DAS. Para avaliação da dinâmica dos herbicidas em palha, lâminas de chuva acumuladas (5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm) foram simuladas em diferentes períodos após a aplicação de 2,4-D sal de colina (912 g e.a. ha⁻¹) e Dicamba sal de DGA (480 g e.a. ha⁻¹) e alíquotas das soluções lixiviadas foram coletadas e quantificadas por HPLC MS/MS. Para avaliação do período residual de controle, foram realizadas curvas de dose-reposta com os mesmos herbicidas aplicados na pré-emergência das espécies em solo com presença e ausência de 5 t ha⁻¹ de palha de milho. Para 2,4-D sal de colina as doses foram 0, 57, 114, 228, 456,

912, 1824 e 3648 g e.a. ha⁻¹. Para Dicamba sal de DGA as doses foram 0, 30, 60, 120, 240, 480, 960 e 1920 g e.a. ha⁻¹. Avaliou-se NP e MSPA aos 21 dias após a aplicação. A palha recobrindo o solo reduziu a emergência de todas as espécies avaliadas, exceto para *E. heterophylla*. A quantidade dos herbicidas lixiviados na palha é maior para 2,4-D em comparação ao dicamba e aumenta para ambos herbicidas em decorrência do maior volume de chuvas. Quanto maior o período sem ocorrência da primeira lâmina de chuva, menor é a quantidade recuperada dos herbicidas aplicados na palha. Os primeiros 10 mm de chuva são os mais importantes em termos de disponibilização de 2,4-D e dicamba. Sem a presença de palha sobre o solo, o 2,4-D é eficaz em *Digitaria insularis*, *Conyza* spp. e *Amaranthus hybridus*, já dicamba é eficiente em todas as espécies avaliadas. A palha de milho potencializa a ação de controle de 2,4-D e dicamba devido ao efeito físico na supressão das espécies, melhora o espectro de controle e pode prolongar o período residual de controle em função do regime de chuvas e disponibilização gradativa para os solos. Ambos herbicidas apresentam ação residual de controle e possuem potencial para serem utilizados como pré-emergentes em áreas com a presença ou ausência de palha.

Palavras-chave: biologia; manejo; cobertura vegetal; cromatografia; dinâmica; eficácia; herbicidas auxínicos; plantas daninhas; pré-emergência.

ABSTRACT

Soybeans and corn are crops of great importance to the world agricultural economy. In Brazil, no-tillage system its main cultivation modality in the succession of crops with soybean and corn. However, over the years many resistant weed species were selected due to the continuous use of some herbicides, mainly glyphosate, generating negative impacts on management. Because the limitation of molecules available to manage these plants effectively and selectively in these crops, the use of herbicide-tolerant varieties already on the market has been increasingly present, as is the case of Corteva's Enlist™ system and Bayer's Xtend® platform. However, there is a lack of studies that better expose the agronomic potential of these new technologies. For this, three studies were conducted between the years 2019 and 2020, in a greenhouse and laboratory, to confirm the hypothesis that 2,4-D and dicamba herbicides have a residual control action on weeds and that the presence of corn straw in the system can suppress the development of these plants and also interfere with the residual action of these herbicides. The objectives were I) - to evaluate the influence of corn straw on the emergence and growth process of *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* and *Eleusine indica*, II) - to evaluate the dynamics of 2,4-D choline salt and dicamba diglycolamine salt (DGA) in corn straw and III) – to evaluate the residual control effect in these species considering the presence and absence of straw and the rainfall regime. For the emergence and growth experiments, the seeds of the species that were sown in soil in the presence and absence of 5 t ha⁻¹ of corn straw were used as reproductive structures. The number of plants (NP) at 7, 14 and 21 days after sowing (DAS) and dry biomass (DB) at 21 DAS were evaluated. To evaluate the dynamics of herbicides in straw, accumulated rainfall (5, 10, 20, 35, 50 and 100 mm) were simulated at different periods after the application of 2,4-D choline salt (912 g ae ha⁻¹) and Dicamba DGA salt (480 g ae ha⁻¹) and aliquots of the leached solutions were collected and quantified by HPLC MS/MS. To evaluate the residual period of control, dose-response curves were performed with the same herbicides applied in the pre-emergence of the species in soil with and without the presence and absence of 5 t ha⁻¹ of corn straw. For 2,4-D choline salt the doses were 0, 57, 114, 228, 456, 912, 1824 and 3648 g ae ha⁻¹. For Dicamba DGA salt the doses were 0, 30, 60, 120, 240, 480, 960 and 1920 g ae ha⁻¹. NP and DB were evaluated

21 days after application. Straw covering the soil reduced the emergence of all species evaluated, except for *E. heterophylla*. The amount of herbicide leached into the straw is greater for 2,4-D compared to dicamba and increases for both herbicides due to the greater volume of rainfall. The longer the period without the occurrence of the first rainfall, the smaller the amount of herbicide applied to the straw is recovered. The first 10mm of rain is the most important in terms of availability of 2,4-D and dicamba. Without the presence of straw on the ground, 2,4-D is effective in *Digitaria insularis*, *Conyza* spp. and *Amaranthus hybridus*, while dicamba is efficient in all species evaluated. Corn straw enhances the control action of 2,4-D and dicamba due to the physical effect in the suppression of species, improves the control spectrum and can extend the residual period of control due to the rainfall regime and gradual availability for the soils. Both herbicides have a residual control action and have the potential to be used as pre-emergence in areas with or without straw.

Keywords: auxinic herbicides; biology; management; chromatography; dynamic; efficacy; pre-emergence; vegetation cover; weeds.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
CAPÍTULO 1 - EFEITO DA PALHA DE MILHO SOBRE A EMERGÊNCIA E CRESCIMENTO DE PLANTAS DANINHAS.....	21
RESUMO.....	21
ABSTRACT.....	22
1.1 INTRODUÇÃO.....	23
1.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
1.4 CONCLUSÕES.....	37
REFERÊNCIAS	38
CAPÍTULO 2 - DINÂMICA EM PALHA E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS COM 2,4-D.....	43
RESUMO	43
ABSTRACT	44
2.1 INTRODUÇÃO.....	45
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	46
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
2.4 CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS	69
CAPÍTULO 3 - DINÂMICA EM PALHA E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS COM DICAMBA.....	75
RESUMO	75
ABSTRACT.....	76
3.1 INTRODUÇÃO.....	77
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	78
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	85
3.4 CONCLUSÕES.....	99
REFERÊNCIAS	101
CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
REFERÊNCIAS	109

INTRODUÇÃO GERAL

Com o crescimento contínuo da população mundial estimado em 10 bilhões de habitantes até 2050, a produção de alimentos precisará aumentar em ao menos 70% (FAO, 2018). Esse é um grande desafio para o setor agrícola, a expansão de terras para cultivo é fator limitante e a principal alternativa passa ser a adoção de pacotes tecnológicos que visem o aumento da produtividade. Diante deste cenário, a interferência de plantas daninhas em culturas tem papel de destaque, elas reduzem significativamente a produção agrícola e diminuem o lucro dos agricultores. Globalmente estima-se que o custo anual com a interferência dessas plantas chegue a 1,4 trilhões de dólares, sendo que no Brasil esse valor pode chegar a 100 bilhões de dólares (CONABIO, 2015).

Para minimizar esse impacto é evidente a necessidade de se manejar adequadamente as plantas daninhas. Devido ao rendimento operacional, baixa dependência de mão de obra e bom custo benefício, os herbicidas tem sido a principal ferramenta utilizada pelos agricultores (EMBRAPA, 2020). Entretanto, o manejo com esses produtos tem se tornado complexo, principalmente devido a diversidade de espécies daninhas, ao surgimento de biótipos resistentes e falta de novos mecanismos de ação disponíveis para comercialização nos últimos anos.

Frente a essa situação, os herbicidas auxínicos tornam-se opções valiosas para manejar plantas daninhas de difícil controle. Eles são similares a auxina natural ácido indol-3-acético (AIA) e são divididos em 5 grupos químicos, com destaque para os ácidos fenoxi-carboxílicos (ácido 2,4-diclorofenoxiacético – 2,4-D) e os ácidos benzoicos (ácido de 3,6-dicloro-o-anisico - dicamba) (GEORGE, 1963). Em uma escala global, aproximadamente 366 milhões de hectares são tratados anualmente com esses produtos, sendo superado apenas pelos herbicidas inibidores da ALS (598 milhões ha) e da EPSPS (477 milhões ha) (BUSI et al., 2018).

Mesmo após décadas de seu uso contínuo, a evolução da resistência é considerada baixa, são 41 espécies relatadas com o primeiro caso descrito em 1957 (HEAP, 2021). Isso se deve provavelmente ao seu múltiplo modo de ação que ainda não é totalmente compreendido. As plantas percebem os sinais externos ou internos (ambiental ou fisiológico) por meio de proteínas sensores denominados receptores (TAIZ; ZEIGER, 2009). Para as auxinas sintéticas, existe na membrana plasmática

relatados três receptores responsáveis por iniciar o sinal. A ABP1 (auxin bindin protein 1) que está relacionada ao processo de expansão celular, a SKP2A (S-Phase Kinase Associated Protein 2A) que está relacionada ao processo de divisão celular e a TIR1/AFB (transport inhibition response e auxin signaling F-box binding) relacionadas com a expressão gênica para a biossíntese de ácido abscísico e etileno (GROSSMANN, 2010).

Localizada próximo a membrana plasmática, a proteína ABP1, ao se ligar com a auxina e levar seu sinal ao núcleo da célula, codifica-o para formar m-RNA e sintetizar a enzima H^+ ATPase (HERTEL et al., 1972). Uma vez ativada, essa enzima segue para a membrana plasmática onde induzirá a superatividade das bombas de prótons que, por sua vez, fazem aumentar a concentração de H^+ no exterior celular levando ao decline do pH fora dela (TROMAS et al., 2010; SAUER; KLEINE-VEHN, 2011). Nessa condição, proteínas denominadas expansinas são ativadas e quebram as ligações de microfibrilas de celulose e hemicelulose da parede celular (enfraquecimento das pontes de hidrogênio existentes entre os polissacarídeos) promovendo o afrouxamento dessas células (WOLF et al., 2012). O desbalanço eletroquímico causado pelo efluxo de H^+ , induz a abertura de canais de potássio na célula levando-o para o seu interior. A alta concentração de potássio intracelular, ocasiona o influxo de água levando ao aumento da turgidez celular promovendo crescimento desordenado e/ou rompimento da célula (MICHELET; BOUTRY, 1995; MAESHIMA, 2001).

A variação de turgor pode promover também abertura de canais de cálcio e rearranjo das membranas de fosfolipídios interrompendo a expansão celular (MONSHAUSEN; GILROY, 2009). Primeiro, inibe a ação de ATPases e o efluxo de H^+ , levando à alcalinização no apoplasto e inibindo a atividade das expansinas e outras proteínas envolvidas na expansão celular. Em seguida, a ação do Ca^{2+} na enzima ativa o fosfatidilinositol-3-fosfato, que fosforila os componentes da NADPH oxidase e produz espécies reativas de oxigênio (MONSHAUSEN; GILROY, 2009).

O ABP1 também ativa uma pequena proteína G chamada RAC/ROP GTPase. As proteínas G têm um papel fundamental na transdução de sinal nas células eucarióticas, ativando cascatas de sinalização que regulam o crescimento e o desenvolvimento (BERKEN; WITTINGHOFER, 2008). RAC/ROP são proteínas G específicas de plantas que podem se conectar facilmente às moléculas de armazenamento de energia semelhantes ao ATP [trifosfato de guanina (GTP) e

difosfato de guanina (PIB)] (BERKEN; WITTINGHOFER, 2008). Assim, no ambiente celular, os RAC/ROPs são encontrados em três configurações, um estado livre (sem ligação), um estado ativo quando conectado ao GTP e um estado inativo quando vinculado ao PIB (CHRISTOFFOLETI et al., 2015). Xu et al. (2010) estudaram GTPases RAC/ROP específicas, chamadas ROP2 e RAP6, e descobriram que essas proteínas ativadas pela ABP1 são importantes para modular a coordenação espacial. Elas têm um papel importante na organização do citoesqueleto, modelando a estrutura e o arranjo dos filamentos de actina e microtúbulos (CHRISTOFFOLETI et al., 2015).

A ação dos herbicidas auxínicos nas estruturas de actina leva à epinastia das plantas e a alteração da mobilidade dos peroxissomos e mitocôndrias nos ambientes celulares (RODRÍGUEZ-SERRANO et al., 2014). Como essas organelas se movem ao longo do citoesqueleto, os distúrbios da actina provavelmente afetam o metabolismo dos peroxissomos e das mitocôndrias, pois compartilham muitos metabólitos entre si e com os cloroplastos (RODRÍGUEZ-SERRANO et al., 2014). Como os peroxissomos são organelas antioxidantes, sua função mais importante é remover as espécies reativas de oxigênio (EROS) de diferentes partes da célula. Considerando o efeito dos herbicidas auxínicos na redução da agregação e polimerização de actina, a defesa antioxidante dos peroxissomos começa a ter uma funcionalidade diminuída. Assim, a célula entra em um estado de estresse oxidativo severo devido à limitação colocada nos peroxissomos e na função da mitocôndria (CHRISTOFFOLETI et al., 2015).

Existe ainda outra rota de sinalização induzida por auxina envolvida na degradação de proteínas e desenvolvimento celular. Este caminho de degradação proteica é regulado por um proteassomo denominado de SCF (*complexo de Skp, culina e proteínas F-box*) e pela proteína SKP2A que atua como reguladora da divisão celular (POZO et al., 2002; POZO et al., 2006). É formado um complexo denominado SCF-SKP2A que irá regular duas transcrições (E2FC e DPB - quinases dependentes de ciclina na via do retinoblastoma) (POZO et al., 2002; POZO et al., 2006). Em baixos níveis de auxina, DPB e E2FC regulam a expressão dos genes necessários para que a célula evolua da fase G1 (síntese e crescimento de proteínas) para a fase S (duplicação de DNA) (DE VEYLDER et al., 2003; DEWITTE; MURRAY, 2003). Em níveis altos da auxina, SCF-SKP2A induz degradação de E2FC e DPB, conseqüentemente, não ocorre a expressão dos genes necessários

para que o ciclo celular ocorra e a célula vegetal permanece na fase G1, por consequência a planta não desenvolve e morre (DE VEYLDER et al., 2003; DEWITTE; MURRAY, 2003).

As auxinas também regulam a expressão de genes através do receptor TIR1/AFB e proteínas componentes de SCF (Skp, Culina e proteínas F-Box) na rota de ubiquitinação (TAIZ; ZEIGER, 2009). Essa rota desempenha papel chave na maioria das rotas de percepção hormonal e direciona uma proteína para ser destruída. Quando a auxina está em alta concentração, ela se liga ao seu receptor TIR1/AFB que, por sua vez, irá atuar como uma “cola molecular” unindo a interação entre TIR1/AFB e AUX/AIA (TAN et al., 2007). A proteína ubiquitina é conjugada a uma série de enzimas de ativação denominadas E ligases e se associa-se a um complexo denominado SCF (Skp, culina e proteínas F-box). O Complexo ativado TIR1/AFB - AUX/AIA-SCF^{TIR1} promove a ubiquitinação da proteína AUX/AIA, levando a sua rápida degradação no proteassomo 26S (BADESCU; NAPIER, 2006; TAN et al., 2007; SAUER et al., 2013). Essa degradação de AUX/AIA permite a formação dos fatores de transcrição à resposta da auxina (ARF) e a ativação dos genes responsivos a auxina (BADESCU; NAPIER, 2006; TAN et al., 2007; SAUER et al., 2013). Esses genes codificam as proteínas ACC sintase e 9-cis-epoxicarotenóide dioxigenase (NCED) que promovem, respectivamente, a biossíntese de etileno e superprodução de ácido abscísico (ABA) (GROSSMANN, 2010).

O ABA em excesso promoverá o fechamento estomático de forma irreversível, limitando a transpiração e a assimilação de carbono, consequentemente reduzindo a fotossíntese e promovendo uma superprodução de espécies reativas de oxigênio (EROS) que ocasionará a peroxidação de lipídeos e morte celular (GROSSMANN, 2007; GROSSMANN, 2010). O etileno, ao ser estimulado em excesso, contribui fortemente para anomalias de crescimento e senescência intensificando os seus efeitos de queda das folhas e epinastia (GROSSMANN, 2007; GROSSMANN, 2010).

A relativa baixa evolução nos casos de resistência a herbicidas auxínicos e a falta de novos mecanismos de ação, despertou interesse da indústria no desenvolvimento de cultivares tolerantes a alguns desses herbicidas. Dentre eles, destacam-se as plataformas Xtend® da Bayer CropScience e Enlist™ da Corteva Agriscience. No sistema Xtend®, tem-se a marca Roundup Ready 2 Xtend® com a

soja tolerante a glyphosate, amônio glufosinato e dicamba e o Roundup Ready 3 XtendFlex® com o algodão tolerante aos mesmos herbicidas (BEHRENS et al., 2007). No sistema Enlist™, tem-se o algodão, soja e milho tolerantes aos herbicidas 2,4-D, glyphosate e amônio glufosinato, sendo o milho tolerante também ao herbicida haloxifope (WRIGHT et al., 2010; ZHOU et al., 2016).

São ferramentas importantes e que auxiliarão os agricultores no manejo de plantas daninhas de difícil controle. Contudo, merecem uma atenção especial pois as culturas não alvo são extremamente sensíveis a herbicidas auxínicos e isso implica em maiores cuidados com a tecnologia de aplicação e formulação desses produtos (JOHNSON et al., 2012). Neste contexto, vários pesquisadores e a própria indústria tem atuado fortemente na compreensão de como os fatores relacionados à deriva, volatilização e contaminação de tanques de pulverizadores contribuem com a fitointoxicação em culturas não alvo, e como mitigar esses efeitos para que o posicionamento técnico de 2,4-D e dicamba ocorra da melhor forma possível (MUELLER et al., 2013; EGAN et al., 2014; BISH; BRADLEY, 2017; CUNDIFF et al., 2017; KALSING et al., 2018; MANUCHEHRI et al., 2020; JONES et al., 2019).

Outra questão importante a ser considerada é o efeito residual que 2,4-D e dicamba possuem nos solos. Neste sentido, a aplicação na pré-emergência das plantas daninhas configura-se como uma nova opção de uso e que precisa ser melhor investigada, especialmente na compreensão de sua dinâmica em coberturas vegetais mortas, uma vez que o sistema de semeadura direta (sistema de plantio onde as culturas são semeadas diretamente sobre os restos culturais deixados pela cultura antecessora) é amplamente adotado e está presente em cerca de 116 milhões de hectares em todo o mundo (DERPSCH et al., 2010) e continua se expandindo.

A presença da palha na superfície do solo exerce influência na população das plantas daninhas presentes na área e interfere no comportamento dos herbicidas que possuem ação residual, promovendo a retenção na cobertura morta e, consequentemente, o aumento na suscetibilidade aos processos de fotólise e/ou volatilização (VELINI, 1992). O percentual do herbicida que conseguir chegar ao solo poderá passar ainda por processos de sorção, lixiviação, degradação ou ser absorvido pelas plantas presentes (VELINI, 1992). Todos esses processos alteram a persistência desses produtos no ambiente e determinarão a quantidade que

efetivamente estará disponível na solução do solo para o controle das plantas daninhas.

Entretanto, existe pouca informação sobre a dinâmica e liberação desses compostos em coberturas vegetais mortas, sobretudo em palha de milho nas áreas de plantio direto. O que se sabe é que a interação da palha com os herbicidas depende principalmente das características físico-químicas, tais como a constante de equilíbrio de ionização de um ácido ou base fraca (pKa), o coeficiente de partição octanol-água (Kow), a solubilidade em água (S), a pressão de vapor (PV) e a meia-vida ($T_{1/2}$), e das condições ambientais, especialmente a temperatura, luminosidade e o regime de chuvas que ocorrem durante e após a aplicação desses herbicidas (CHRISTOFFOLETI; LOPEZ-OVEJERO, 2005; RODRIGUES, 1993).

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram avaliar o efeito da palha de milho sobre a emergência e crescimento das principais plantas daninhas de difícil controle no sistema de produção soja/milho, sendo: *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*, a dinâmica de 2,4-D e dicamba na palha de milho em função de diferentes volumes e períodos de chuva e sua ação residual de controle, considerando a presença, ausência e a dinâmica em palha.

CAPÍTULO 1

EFEITO DA PALHA DE MILHO SOBRE A EMERGÊNCIA E CRESCIMENTO DE PLANTAS DANINHAS

Tiago Gazola^{*1}, Caio Antonio Carbonari¹, Edivaldo Domingues Velini¹

¹Department of Agronomy (Crop Protection), Faculty of Agricultural Sciences, São Paulo State University - UNESP, Botucatu, SP, Brazil.

*Corresponding author: <tiago-gazola@hotmail.com>

RESUMO

Foram conduzidos quatro experimentos entre os anos de 2019 e 2020 em casa de vegetação. Os objetivos foram avaliar o efeito de 5 t ha⁻¹ de palha de milho na emergência e crescimento das plantas daninhas *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*. Aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura (DAS) avaliou-se o número de plântulas emergidas, aos 21 DAS foram avaliados a biomassa e a correlação entre esses parâmetros. A palha recobrindo o solo reduziu a infestação de todas as espécies, exceto de *E. heterophylla*. Para essa espécie há correlação positiva para os parâmetros avaliados, evidenciando que a palha não exerce influência na sua emergência e crescimento. Para as demais espécies não há correlação entre os parâmetros avaliados, evidenciando que a palha promove supressão na emergência e crescimento das plantas. Conclui-se que 5 t ha⁻¹ de palha de milho recobrindo o solo é uma excelente ferramenta no controle das espécies avaliadas, exceto para *E. heterophylla*, e uma ótima opção para compor o manejo integrado de plantas daninhas podendo complementar o efeito residual dos herbicidas.

Palavras-chave: biologia; manejo; cobertura vegetal; eudicotiledôneas; monocotiledôneas; plantio direto; *Zea mays*.

CHAPTER 1

WEED EMERGENCE AND GROWTH IN SOIL COVERED WITH CORN STRAW

ABSTRACT

Four assays were conducted between the years 2019 and 2020 in a greenhouse. The objectives were to evaluate the effect of 5 t ha⁻¹ of corn straw on the emergence and growth of weeds *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* and *Eleusine indica*. At 7, 14 and 21 days after sowing (DAS), the number of seedlings emerged was evaluated, at 21 DAS the dry biomass and the correlation between these parameters were evaluated. The straw covering the soil reduces the infestation of the all species, except for *E. heterophylla*. For this specie, there is a positive correlation for the evaluated parameters, showing that straw doesn't influence in the emergence and growth. For the other species, there is not correlation between the parameters evaluated, showing that the straw promotes suppression in germination and plant growth. It's concluded that 5 t ha⁻¹ of corn straw covering the soil is excellent tool in the control of the species evaluated, except for *E. heterophylla*, and a great option to compose the integrated management of weeds and can complement the herbicides residual effect.

Keywords: biology; management; dicotyledonous; monocotyledonous; no-tillage system; vegetative cover; *Zea mays*.

1.1 INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e o milho (*Zea mays* L.) são culturas de grande relevância no cenário mundial com uma produção global de 337,2 milhões e 1,16 bilhão de toneladas, respectivamente (USDA, 2020). O Brasil é o maior produtor de soja e o terceiro maior produtor de milho, na safra 2019/20 o país colheu 124 milhões de toneladas da oleaginosa e 101 milhões de toneladas do cereal (CONAB, 2019). Para atingir esses patamares de produção, o manejo da fertilidade do solo e o controle fitossanitário, especialmente o de plantas daninhas, são fundamentais. Se não manejadas adequadamente, essas plantas promovem redução acima de 80% na produtividade dessas culturas (KARAM et al., 2006; SILVA et al., 2008).

Devido ao sistema de plantio direto (SPD) ser amplamente adotado, o controle mecânico de plantas daninhas passa a ser inviabilizado já que o solo deixa de ser revolvido antes ou após a semeadura dessas culturas, tornando os herbicidas a principal ferramenta de controle. Para os produtos que são aplicados na pré-emergência, a palha deixada pelas culturas é uma barreira importante para o seu transporte até a superfície do solo, sendo esse movimento influenciado pela água da chuva ou irrigação e principalmente pela solubilidade e o tipo de formulação do herbicida (MACIEL; VELINI, 2005; SIMONI et al., 2006; RODRIGUES, 1993).

A palha altera também a dinâmica populacional de plantas daninhas devido a barreira física imposta, reduções na passagem de luz, reduções na amplitude térmica, liberação de compostos com efeito alelopático e também servindo de abrigo para animais e microorganismos presentes no meio que podem deteriorar as sementes (RICE 1984; EGLEY; DUKE, 1985; VIDAL; THEISEN, 1999; VELINI; NEGRISOLI, 2000; BEYAERT et al., 2002; SILVA et al., 2003; CORREIA; DURIGAN, 2004). Entretanto esse efeito é bastante específico e depende do tipo de palha presente, da quantidade e uniformidade de distribuição, do tempo de permanência e nível de decomposição no solo e, principalmente, das espécies daninhas que podem ou não serem favorecidas por sua presença (GRAVENA et al., 2004). Além disso, as plantas daninhas apresentam padrões de germinação, emergência e crescimento complexos e muitas vezes eles são diferentes entre as espécies e até mesmo entre os tipos de cultivo (GHERSA et al., 1994).

Neste sentido, há diversos trabalhos que demonstram o efeito da palha de forrageiras, culturas de inverno e cana-de-açúcar na supressão de plantas daninhas

(NAGABHUSHANA et al., 2001; AZANIA et al., 2002; CORREIA; DURIGAN, 2004; TREZZI; VIDAL, 2004; COELHO et al., 2016). Entretanto, em áreas de SPD onde o cultivo ocorre em sucessão de culturas, principalmente soja/milho segunda safra, essas informações não são encontradas com tanta frequência. O SPD no Brasil ocupada ao redor de 33 milhões de hectares (IBGE, 2017) e, portanto, compreender o efeito da palha de milho em plantas daninhas predominantes nesse sistema é de grande importância.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito de 5 t ha^{-1} de palha de milho na emergência e crescimento das principais espécies infestantes de culturas anuais: *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos quatro experimentos em casa de vegetação entre os anos de 2019 e 2020. Foi realizado um teste prévio de germinação e a quantidade de sementes de cada espécie foi padronizada pelo seu peso, sendo: *D. insularis* 0,200 g; *Conyza* spp. 0,400 g; *B. pilosa* 0,350 g; *A. hybridus* 0,050 g; *E. heterophylla* 0,400 g; *E. indica* 0,070 g. Após pesadas, as sementes de todas as espécies foram misturadas e acondicionadas em sacos de papel para posterior semeadura em bandejas plásticas medindo 27 x 41 cm com capacidade para 7,5 L.

O solo utilizado foi adubado e armazenado em sacos plásticos individuais por um período de quarenta dias até o dia da semeadura das espécies. As características físico-químicas apresentadas foram: 281, 87 e 632 g dm^{-3} de argila, silte e areia, respectivamente; pH (CaCl_2) = 5,3; M.O. = 11 g dm^{-3} ; P (resina) = 18 mg dm^{-3} ; Al^{3+} = 2 mmolc dm^{-3} ; H+Al = 40 mmolc dm^{-3} ; K^+ = 0,8 mmolc dm^{-3} ; Ca^{2+} = 21 mmolc dm^{-3} ; Mg^{2+} = 9 mmolc dm^{-3} ; SB = 31 mmolc dm^{-3} ; CTC (T) = 70 mmolc dm^{-3} ; S = 56 mg dm^{-3} e V% = 42.

A palha utilizada foi coletada em lavouras de milho híbridos Pioneer® P3707 VYH, Forseed® FS 587 PWU e Dekalb® DKB 345 PRO3, sem histórico de aplicação de herbicidas. Para isso, folhas foram coletadas em plantas que se apresentavam no estágio de senescência, cortadas em pequenos fragmentos de aproximadamente 5 x 3 cm e homogeneizadas formando-se uma mistura dos híbridos.

Os tratamentos consistiram em ausência e presença de 5 t ha⁻¹ da palha de milho recobrando o solo. Para a semeadura, as bandejas foram preenchidas com 3,5 L do solo seco e peneirado, acomodou-se em seu centro uma moldura metálica medindo 24 x 38 cm onde as sementes de todas as espécies foram distribuídas uniformemente em seu interior. Em seguida, realizou-se a cobertura com mais 1,5 L de solo e retirou-se cuidadosamente a moldura, mantendo as sementes a aproximadamente 1 cm de profundidade na área útil onde o aro esteve presente. O uso da moldura foi necessário para garantir que o efeito físico da palha na emergência das espécies não fosse prejudicado. Para os tratamentos contento a palha, a mesma foi depositada uniformemente sobre o solo logo após a retirada da moldura.

Imediatamente após a semeadura, todas as parcelas foram submetidas a simulação de 10 mm de chuva com auxílio de um pulverizador estacionário constituído por estrutura metálica que se desloca por uma área útil de 6,0 m² no sentido do seu comprimento, e que é tracionada por um conjunto de motor elétrico e modulador de frequência tornando possível o controle da velocidade de trabalho. Uma barra de pulverização foi acoplada ao sistema e posicionada no sentido longitudinal às unidades experimentais. A barra contém dez pontas de pulverização Teejet® DG 9505 EVS, espaçadas em 6,5 cm entre si, e dispostas a 0,5 m de altura em relação ao alvo, com pressão de trabalho de 2,0 kgf cm⁻² e operada para produção de lâminas variáveis, de modo que, a cada movimento da barra de aplicação, um acumulado de 2,5 mm é gerado. Durante o experimento, as parcelas foram irrigadas cuidadosamente com 10 mm de água de acordo com a necessidade das plantas e a temperatura foi constantemente monitorada.

O efeito da palha na emergência e crescimento das plantas foi obtido mediante a contagem do número de plântulas emergidas (NP) aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura (DAS) e da quantificação de massa seca da parte aérea (MSPA) aos 21 DAS. O material cortado foi seco em estufa de circulação forçada de ar a uma temperatura de 60°C, até massa constante, para posterior pesagem em balança de precisão 0,0001g.

1.2.1 Análise estatística

O delineamento utilizado foi o inteiramente casualizado com 4 e 8 repetições para a ausência e presença de palha, respectivamente. Para avaliação do NP adotou-se o esquema fatorial do tipo 2 x 3, onde o fator *a* correspondeu aos tratamentos com e sem palha e o fator *b* aos períodos de avaliação após a semeadura. Satisfazendo a homogeneidade dos dados mediante a avaliação da grandeza dos quadrados médios residuais, os experimentos foram agrupados totalizando 16 e 32 repetições para ausência e presença de palha, respectivamente.

Os resultados de NP e MSPA, para cada espécie daninha, foram submetidos à análise de variância pelo teste de F e comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Adicionalmente, os resultados foram convertidos em porcentagem em relação ao tratamento com ausência de palha (testemunhas).

Para determinar a relação entre a emergência e crescimento das plantas daninhas, realizou-se a correlação linear de Pearson entre as variáveis NP e MSPA, de acordo com a equação proposta por Swinscow (1997):

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

onde: *x* representa os valores do número de plantas de cada espécie, *y* indica o teor de biomassa seca de cada espécie, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias amostrais de cada variável, Σ simboliza o somatório e *r* o coeficiente de determinação.

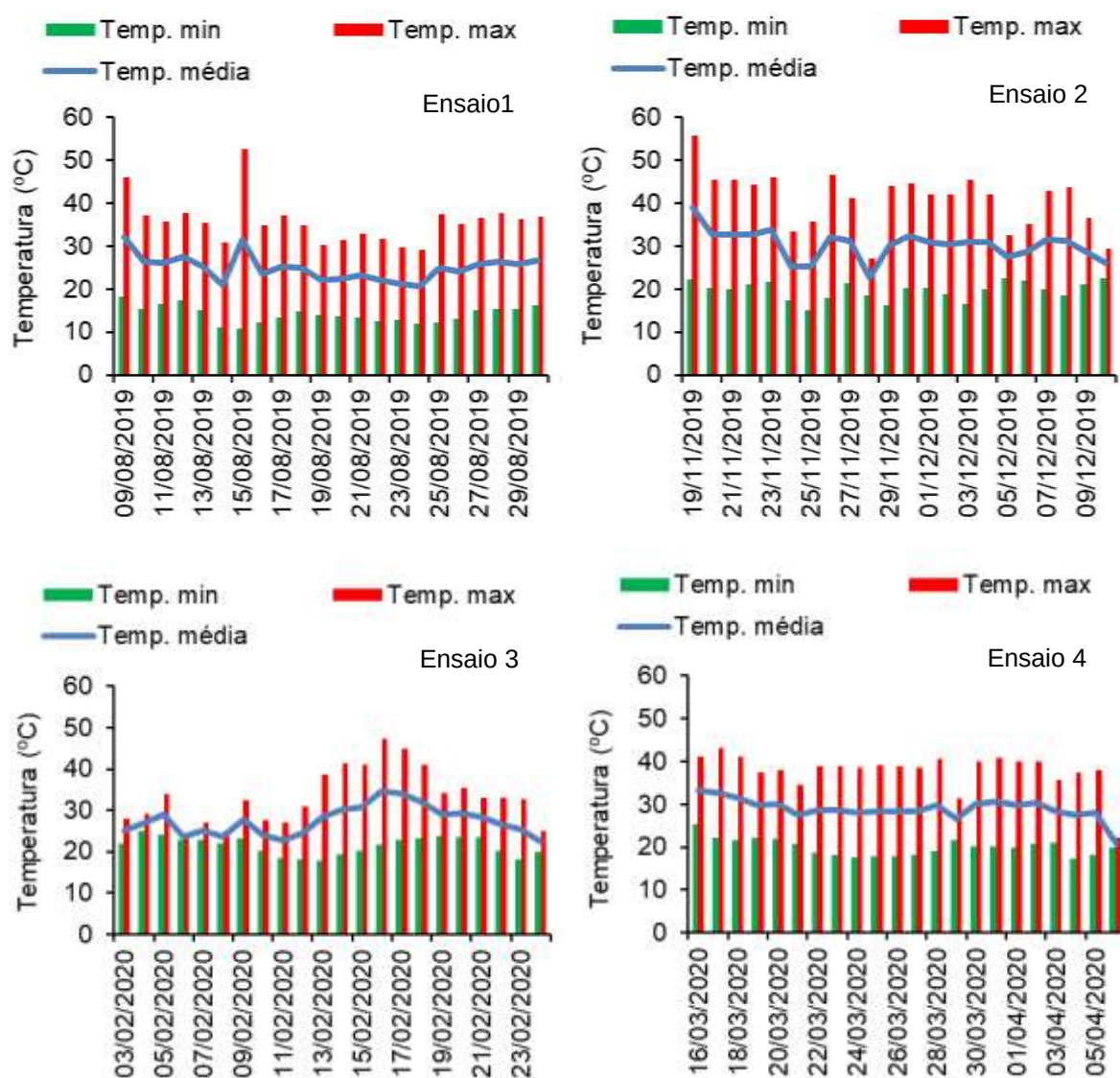
As análises estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS Institute, version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA).

1.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante a condução dos experimentos, a temperatura média no interior da casa de vegetação não sofreu grandes oscilações (Figura 1), as condições hídricas foram similares para todas as unidades experimentais (simulação de chuva de 10

mm + irrigações de 10 mm conforme necessidade das plantas), o solo utilizado foi adubado e corrigido individualmente e igualmente para cada unidade experimental e a semeadura ocorreu na mesma profundidade para todas as espécies (1 cm).

Figura 1 – Condições climáticas dentro da casa de vegetação no período em que os experimentos foram conduzidos



Esse tipo de controle experimental realizado é fundamental para minimizar fatores externos que possam influenciar nos resultados obtidos. Isso porque a biologia das plantas daninhas é diretamente influenciada pelos fatores ambientais e edáficos na qual estão submetidas (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011). Desta forma, eliminaram-se as variabilidades climáticas e edáficas garantindo que as alterações

na emergência e crescimento das plantas fossem relacionadas apenas com a presença e ausência da palha de milho recobrindo o solo.

Nota-se no resumo da análise de variância para o número de plantas emergidas de cada espécie daninha aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura (DAS), que houve diferença significativa entre os tratamentos com a ausência e presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho recobrindo o solo no momento da semeadura, e que esse efeito só não foi observado para a espécie *Euphorbia heterophylla* (Tabela 1). Com relação ao período de avaliação, houve diferença significativa para o número de plantas emergidas em todas as espécies, já para a interação entre os fatores essa diferença não foi observada em *E. heterophylla* e *Eleusine indica* (Tabela 1).

Tabela 1 – Resumo da análise de variância para número de plantas emergidas de cada espécie daninha aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura

Espécies	F trat	F período	F TxP	CV (%)
<i>Digitaria insularis</i>	979,35**	146,51**	103,69**	33,89
<i>Conyza</i> spp.	1353,30**	114,01**	114,01**	37,66
<i>Bidens pilosa</i>	331,31**	263,46**	63,71**	35,15
<i>Amaranthus hybridus</i>	1084,53**	20,32**	8,13**	26,33
<i>Euphorbia heterophylla</i>	0,03 ^{ns}	66,23**	0,01 ^{ns}	26,78
<i>Eleusine indica</i>	721,81**	5,37**	0,66 ^{ns}	35,83

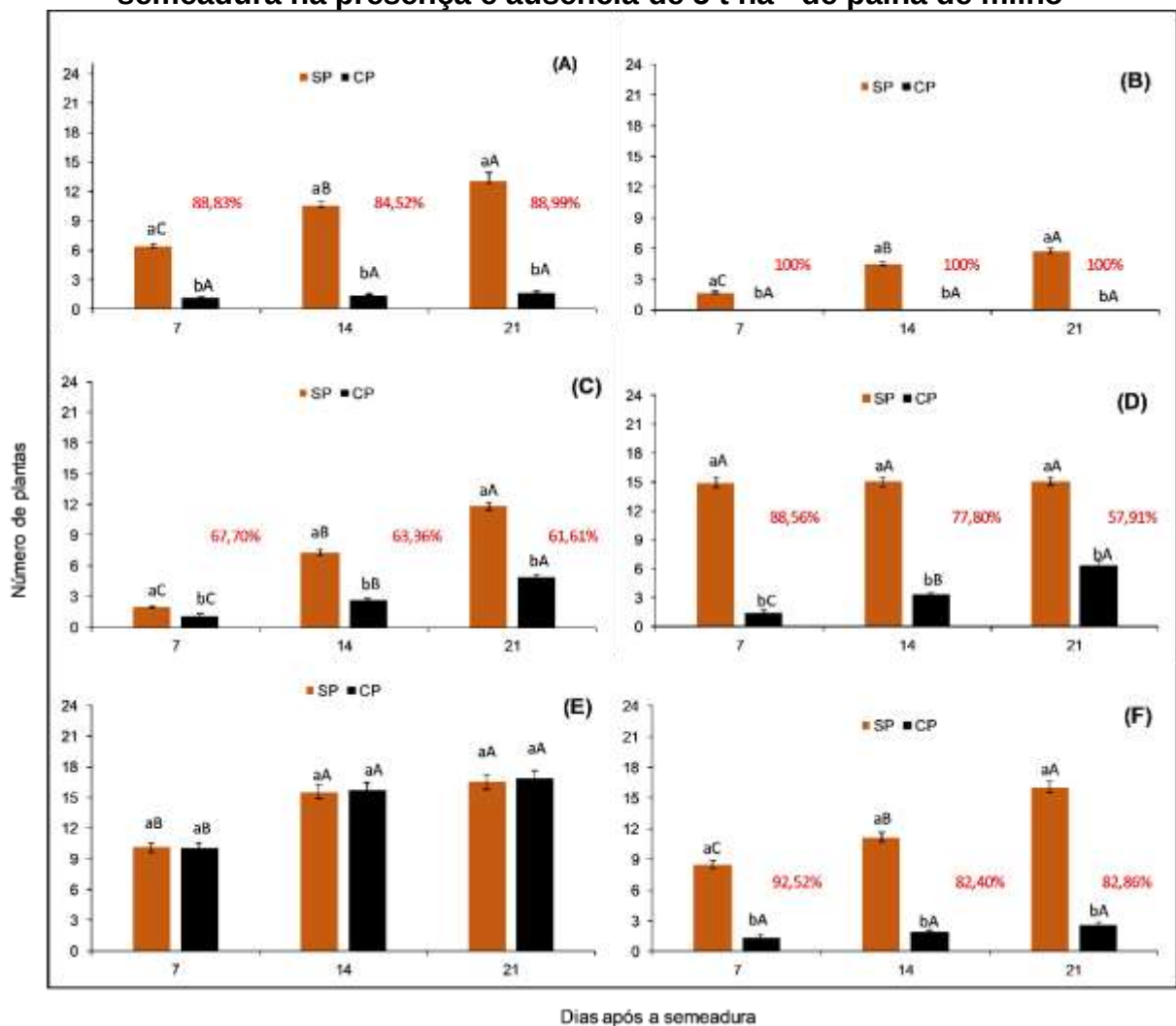
^{ns}, ** Não significativo e significativo a 1 % de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F. CV = coeficiente de variação.

A cobertura vegetal morta pode afetar o comportamento das espécies devido a liberação de compostos aleloquímicos por algumas espécies, por filtrar a quantidade e qualidade dos comprimentos de ondas luminosas que chegam à superfície do solo e por promover a manutenção da temperatura, consequentemente, minimizando suas oscilações (PITELLI, 1997; THEISEN; VIDAL, 1999; AZANIA et al., 2002). Além disso, pode reduzir a sobrevivência de plantas daninhas com pequena quantidade de reservas nas sementes, já que muitas vezes essas reservas não são suficientes para garantir a sobrevivência das plântulas no espaço percorrido dentro da cobertura morta para ter acesso à luz e iniciar o processo fotossintético (PITELLI, 1998).

Para a espécie *Digitaria insularis*, em solo sem a presença de palha, o fluxo de emergência das plantas foi contínuo até o final das avaliações aos 21 DAS, quando a maior parte das plantas emergiram (Figura 2 A). Já com a presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sobre o solo, o fluxo máximo de emergência ocorreu aos 7 DAS com redução de 88% no número de plantas e 92,41% no acúmulo de biomassa (Figuras

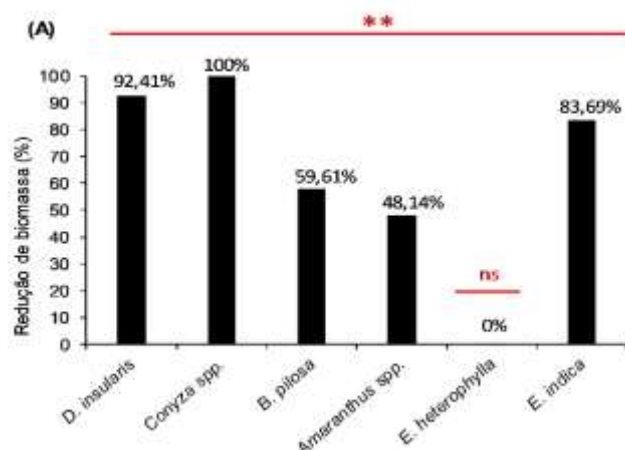
2A e 3). Provavelmente a palha de milho reduziu a temperatura do solo e também dificultou a passagem de luz, influenciando diretamente na redução da infestação já que suas sementes são fotoblásticas positivas e a temperatura ótima para germinação está entre 25 e 35°C (MAYER; POLJAKOFF MAYBER, 1989; VÁZQUEZ-YANES; OROZCO-SEGOVIA, 1993; MENDONÇA et al., 2014).

Figura 2 – Número de plantas e porcentagem de redução de emergência de *Digitaria insularis* (A), *Conyza* spp. (B), *Bidens pilosa* (C), *Amaranthus hybridus* (D), *Euphorbia heterophylla* (E) e *Eleusine indica* (F) aos 7, 14 e 21 dias após a semeadura na presença e ausência de 5 t ha⁻¹ de palha de milho



SP = solo sem a presença da palha; CP = solo com a presença de palha. As barras de erro correspondem ao erro padrão da média $n=16$ e $n=32$, para a ausência e presença de palha, respectivamente. Letras iguais minúsculas no mesmo período e maiúscula em períodos diferentes para SP e CP individualmente, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 3 – Redução de biomassa na presença de 5 t ha⁻¹ palha de milho



ns, ** Não significativo e significativo a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste de F. Valores de F e CV(%), respectivamente para *D. insularis* (147,26**, 56,62), *Conyza spp.* (574,94**, 33,36), *B. pilosa* (97,06**, 33,05), *A. hybridus* (232,87**, 16,62), *E. heterophylla* (0^{ns}; 33,95) *E. indica* (171,12**, 44,01).

Esses resultados evidenciam a elevada sensibilidade da espécie à presença da palha de milho e são similares aos obtidos por Gazziero et al. (2012) que verificaram que quantidades superiores a 4 t ha⁻¹ de palha de trigo reduziu significativamente a emergência de *D. insularis*. São dados importantes pois essa planta daninha tem elevada capacidade de infestação e de rebrota quando perenizada, tornando-a bastante competitiva com as culturas. É comum observar situações de redução acima de 40% na produtividade da soja com a presença de apenas 4 plantas de *D. insularis* por metro quadrado (ADEGAS et al., 2017). Portanto, atuar no banco de sementes e em plantas jovens é fundamental para o manejo da espécie, especialmente devido a sua biologia (GAZOLA et al., 2016) e pela sua resistência múltipla aos herbicidas glyphosate e inibidores da ACCase no grupo dos ariloxifenoxipropionatos (FOPs) (HEAP, 2021). Neste sentido, a palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ demonstrou ser uma excelente ferramenta de manejo atuando fortemente na supressão da emergência das plantas.

Para *Conyza spp.*, houve emergência até os 21 DAS em solo descoberto e com a presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho não houve emergência de plantas e, portanto, redução de 100% no acúmulo de biomassa (Figuras 2B e 3). As espécies desse gênero são de grande importância nos cultivos anuais, especialmente sob plantio direto devido a sua elevada capacidade de produção de sementes (WU; WALKER, 2004; WU et al., 2007) que são leves e se dispersam facilmente pelo vento a grandes distâncias (DAUER et al., 2007; HOLM et al., 1997). Além disso,

suas sementes não apresentam dormência e conseguem germinar prontamente após a dispersão, principalmente quando estão posicionadas na superfície do solo. Isso ocorre porque *Conyza* spp. é fotoblástica positiva e possui sementes pequenas com pouca quantidade de reserva (CONSTANTIN et al., 2013).

A presença de cobertura vegetal prejudica sua germinação devido a barreira física e a menor intensidade de estímulo luminoso. Entretanto, essa cobertura precisa estar em quantidade suficiente e bem distribuída na superfície do solo uma vez que pequenos pontos descobertos ainda permitem sua germinação (CONSTANTIN et al. 2013). De acordo esses os autores, 6 t ha⁻¹ de palha reduziu o número de plantas emergidas de *Conyza* spp., mas não inibiu completamente a emergência justamente pela não total distribuição da palha na superfície do solo. Nesse experimento, 5 t ha⁻¹ de palha com total distribuição sobre o solo foi suficiente para inibir 100% da emergência de *Conyza* spp., confirmando a importância da uniformidade de distribuição (Figuras 2B e 3). Em termos de manejo de *Conyza* spp., a cobertura vegetal é extremamente importante, especialmente devido aos diversos relatos de múltipla resistência a diversos herbicidas no Brasil (HEAP, 2021).

A espécie *Bidens pilosa* apresentou comportamento distinto das demais avaliadas, suas plantas emergiram continuamente até os 21 DAS tanto na ausência quanto na presença de palha de milho (Figura 2 C). Contudo, na presença de palha a emergência foi menor, com redução na quantidade de plantas emergidas variando entre 57 e 63% e redução no acúmulo de biomassa de 59,61% (Figuras 2C e 3). Resultados similares foram observados por Santos et al. (2020) que constataram que sementes de *B. pilosa* a 2 cm de profundidade no solo coberto com 6 t ha⁻¹ de palha de milho sofreram redução de 80% na germinação.

O fato de *B. pilosa* emergir continuamente mesmo com a presença de palha é um indicativo de que a espécie não é dependente de luz para iniciar seu processo germinativo, estando de acordo com os dados obtidos por Klein e Felipe (1999). O efeito da palha na sua supressão provavelmente está relacionado com a amenização da temperatura do solo. As sementes de *B. pilosa* apresentam temperatura ótima de germinação entre 30 e 35°C durante o dia (VOLL et al., 2005) e a palha pode contribuir significativamente na variação e redução dessa temperatura. Ribas et al. (2015) avaliando a influência da palha de *Sorghum sudanense* na temperatura do solo, verificaram que a quantidade de 5 t ha⁻¹ aos 14 dias promoveu redução de aproximadamente 8°C nos primeiros 5 cm de solo.

B. pilosa também está presente em várias regiões produtoras do Brasil e tem grande potencial infestante, com a disseminação de suas sementes ocorrendo pelo vento e, principalmente, pelas suas estruturas farpadas no final dos aquênios que permitem a aderência em roupas, animais e implementos agrícolas (WEBER, 2017). Suas plantas produzem de 3 a 6 mil sementes (GILBERT et al., 2013), que germinam rapidamente após a deposição no solo, permitindo de 3 a 4 ciclos de dispersão de sementes ao ano (WEBER, 2017). Além disso, no Brasil a espécie possui resistência múltipla aos herbicidas imazethapyr (ALS) e atrazina (FSII) (HEAP, 2021). Portanto, a palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ pode ser uma importante ferramenta complementar ao manejo com herbicidas já que reduziu em mais de 60% o nível de infestação da espécie (Figura 2 C).

Para *Amaranthus hybridus*, na ausência de palha o fluxo de emergência das plantas é total já aos 7 DAS (Figura 2 D). Com a presença de palha no solo, a emergência das plantas é continua até os 21 DAS com redução no acúmulo de biomassa de 48,14% (Figuras 2D e 3). Isso provavelmente aconteceu porque o efeito da luz é apenas aditivo ao processo de germinação e não limitante. Carvalho e Christoffoleti (2007) verificaram que espécies do gênero *Amaranthus* spp. conseguem germinar mesmo em condição de escuro. Entretanto, devido ao diminuto tamanho de suas sementes e pouca quantidade de reserva, a palha exerceu forte influência na contenção da emergência das plantas, com reduções de 88,56%, 77,80 e 57,91% aos 7, 14 e 21 DAS, respectivamente (Figura 2 D).

Portanto, a cobertura vegetal de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ é uma excelente ferramenta para compor o manejo integrado de *A. hybridus*. São informações importantes pois plantas desse gênero são observadas com elevada frequência em áreas agrícolas, visto que são de alta produção e viabilidade de sementes (até 500.000 em plantas de grande porte), extenso período de germinação e possuem rápido crescimento (AHRENS et al., 1981; KISSMANN; GROTH, 1999; HORAK; LOUGHIN, 2000).

Para *E. heterophylla*, a presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho não exerceu efeito de supressão na emergência das plantas, independentemente da época avaliada (Figura 2 E). Aos 7 DAS a emergência das plantas foi menor em comparação aos demais períodos. Entretanto, esse efeito aconteceu mesmo com a presença da palha sobre o solo evidenciando que a palha não exerce supressão na emergência da espécie e nem promove redução de biomassa (Figuras 2E e 3).

Marques et al. (2012) relataram germinação de *E. heterophylla* mesmo com 16 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar e atribuíram o resultado ao fato de que a luz não é um fator limitante para sua germinação. Outros autores relatam que só há supressão da germinação de suas sementes a partir de 20 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar (MONQUERO et al., 2007).

Portanto, a palha não é uma ferramenta adequada para compor o sistema de manejo da espécie. Mesmo que a supressão da emergência ocorra a partir de 20 t ha⁻¹ de palha, esta condição é improvável de ser obtida em SPD com culturas anuais. Além disso, essa quantidade de cobertura vegetal prejudica a semeadura das culturas devido à grande densidade de fitomassa que os discos de corte das semeadoras precisam superar, podendo inclusive prejudicar a emergência das culturas e dificultar a transposição de herbicidas residuais para o solo.

A monocotiledônea *E. indica* apresentou resultado similar ao da espécie *D. insularis*, em que também ocorreu processo de emergência escalonada com a máxima emergência das plantas ocorrendo aos 21 DAS em solo descoberto (Figura 2 A, F). Com a presença de palha, houve 82 % de supressão na emergência, com o máximo de plantas emergidas ocorrendo aos 7 DAS e redução no acúmulo de biomassa de 89,69% (Figuras 2F e 3). Esses resultados corroboram com os obtidos por Chauhan e Johnson (2008) que constaram que 4 a 6 t ha⁻¹ de palha é suficiente para reduzir em mais de 80% a germinação de *E. indica*. Os autores evidenciaram também que na presença de luz a germinação é significativamente maior em comparação a ausência, demonstrando o efeito da palha observado.

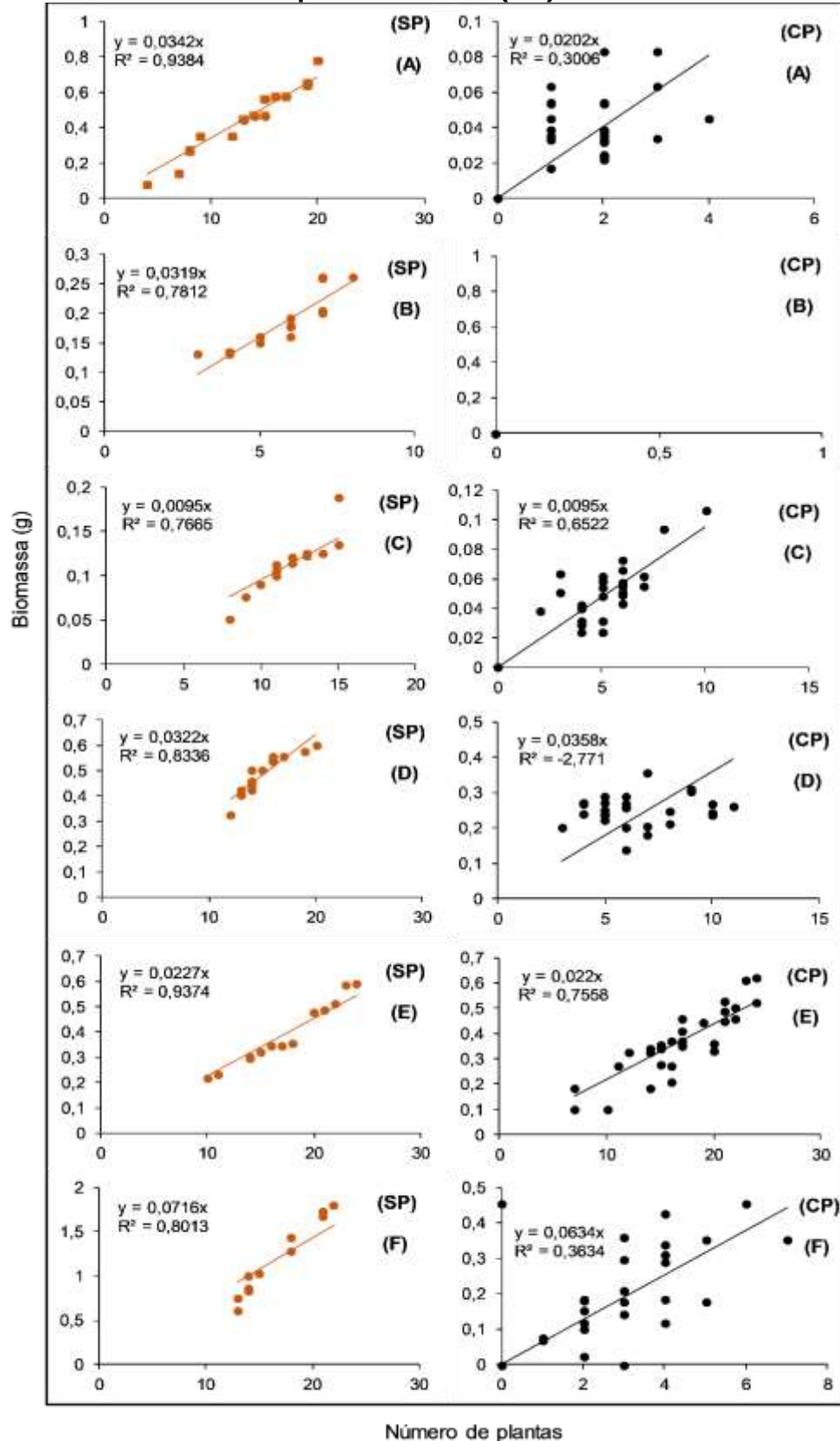
Eleusine indica é uma planta daninha de grande importância e está amplamente dispersa pelas áreas agrícolas do Brasil. Isso ocorre porque ela possui metabolismo fotossintético do tipo C4, o que lhe confere alta taxa de crescimento em condições tropicais, e produz elevado número de sementes (CHAUHAN; JOHNSON, 2008; JALALUDIN et al., 2010). Além disso essa espécie possui resistência múltipla aos dois principais herbicidas utilizados para seu manejo em pós emergência da soja (Glyphosate e inibidores da ACCase no grupo dos Fops) e também resistência simples a herbicidas inibidores da ACCase no grupo dos ciclohexanodionas (Dims) (HEAP, 2021). Neste sentido, a palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ demonstrou ser uma excelente ferramenta para compor o sistema de manejo integrado da espécie.

Já para a interação entre o número de plantas emergidas e a massa seca acumulada, nota-se que para todas as espécies houve alta correlação no tratamento com a ausência de palha de milho sobre o solo (Figura 4). Esses dados indicam que a maioria das plantas que emergiram conseguiram crescer e se desenvolver pois, quanto maior o número de plantas maior foi a biomassa de cada espécie (Figura 4).

Na presença de palha sobre o solo, *E. heterophylla* não sofreu redução na emergência e crescimento apresentando uma correlação de 75%, enquanto que para *D. insularis* (R^2 0,30), *Conyza* spp. (0 plantas), *B. pilosa* (R^2 0,65), *A. hybridus* (R^2 -2,77) e *E. indica* (R^2 0,36) não houve correlação entre o número de plantas emergidas e biomassa devido a não influência da palha na sua emergência e crescimento (Figura 4). Isso significa que a palha reduziu o número de plantas aos 21 DAS (Figura 2) e prejudicou o desenvolvimento delas (Figura 3 A) pois grande parte das plantas que conseguiram emergir ficaram debilitadas devido ao gasto de energia necessário para romper a barreira física imposta pela palha. Segundo Pitelli (1998), a presença da palha sobre o solo reduz a sobrevivência de plantas daninhas com pequena quantidade de reservas nas sementes, já que muitas vezes essas reservas não são suficientes para garantir a sobrevivência das plântulas no espaço percorrido dentro da cobertura morta para ter acesso à luz e iniciar o processo fotossintético.

Entretanto, mesmo que a presença de palha sobre o solo tenha contribuído significativamente na redução da infestação, ainda assim permitiu a emergência de muitas plantas de *D. insularis*, *B. pilosa*, *A. hybridus* e *E. indica*, que posteriormente foram suprimidas e apresentaram desenvolvimento prejudicado acumulando menor biomassa (Figura 4). Portanto, nem sempre a densidade de plantas daninhas no solo se reflete em aumento ou diminuição na infestação. Para esse tipo de estudo, avaliar a biomassa das plantas também é necessário para determinar com mais exatidão os benefícios propiciados pela cobertura vegetal na supressão das plantas daninhas. Neste sentido, a correlação entre o número de plantas e a biomassa pode ser uma ferramenta auxiliar importante em tomadas de decisão, pois permite compreender a importância da palha na dinâmica populacional das plantas daninhas.

Figura 4 – Correlação de Pearson entre o número de plantas emergidas e a biomassa de *Digitaria insularis* (A), *Conyza* spp. (B), *Bidens pilosa* (C), *Amaranthus hybridus* (D), *Euphorbia heterophylla* (E) e *Eleusine indica* (F) aos 21 dias após a semeadura em função da ausência (SP) e presença de 5 t ha⁻¹ palha de milho (CP)



Entender o fluxo de emergência para cada espécie daninha também é importante para definir o momento correto da aplicação dos herbicidas, especialmente os de pós-emergência, já que o tamanho da planta é o principal fator biológico que define o momento correto da pulverização. Além disso, realizar aplicação simplesmente com base na presença da planta daninha pode minimizar o efeito de controle do herbicida, uma vez que os demais fluxos de emergência das plantas não serão controlados pelo produto já pulverizado. Nesta situação uma nova aplicação pode ser necessária aumentando os custos de produção. Uma alternativa é o uso de herbicidas em pré-emergência, pois seu efeito residual promoverá o controle desses fluxos de emergência ao longo do tempo. Entretanto, a presença de palha altera a dinâmica de transporte de boa parte dos herbicidas com ação no solo e deve ser levada em consideração no posicionamento desses produtos (MACIEL; VELINI, 2005; CARBONARI et al. 2008; MATOS et al. 2016).

De um modo geral, as espécies monocotiledôneas foram mais sensíveis ao efeito da palha de milho sobre o solo, com exceção da eudicotiledônea *Conyza* spp. (Figuras 2 e 3). Os resultados evidenciaram a importância da palha no sistema de cultivo, com reduções de infestação dessas espécies variando de 57,91% para *A. hybridus* até 100% para *Conyza* spp. (Figura 2). Complementarmente, a supressão das plantas daninhas pela cobertura vegetal tem potencial de reduzir o uso de herbicidas e melhorar seu efeito de controle, já que atuarão em plantas com menor estágio de desenvolvimento e mais debilitadas devido ao gasto energético necessário para superar a barreira física imposta pela palha. Além disso, a palha tem potencial para contribuir com o manejo da resistência pois reduziu a infestação das plantas, conseqüentemente diminuindo sua dispersão e multiplicação nas áreas.

Esse efeito é importante pois há uma limitação de moléculas herbicidas disponíveis que sejam efetivas nessas plantas. Todas as espécies alvo deste estudo possuem resistência a algum herbicida. *D. insularis* tem resistência múltipla ao glyphosate (EPSPS), haloxyfop e fenoxaprop (ACCase), *Conyza* spp. é ainda mais complexo, existem populações com resistência múltipla a diuron (PSII), paraquat (PSI), glyphosate (EPSPS), 2,4-D (auxínicos) e saflufenacil (PPO), *B. pilosa* possui resistência múltipla a imazethapyr (ALS) e atrazina (PSII), *A. hybridus* tem resistência múltipla a glyphosate (EPSPS) e Chlorimuron (ALS), *E. heterophylla* possui resistência múltipla a vários herbicidas inibidores da protox e ALS e populações com resistência a glyphosate e *E. indica* possui resistência múltipla a

glyphosate, haloxyfop e fenoxaprop e algumas populações resistentes aos inibidores da ACCase do grupo dos DIMs (sethoxydim) (HEAP, 2021).

1.4 CONCLUSÕES

A cobertura vegetal com palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ sobre o solo reduz significativamente a emergência e o crescimento de *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus* e *Eleusine indica* contribuindo com o manejo integrado de plantas daninhas. Entretanto, esses mesmos efeitos não são observados em *Euphorbia heterophylla*.

REFERÊNCIAS

- ADEGAS, F. S. et al. Impacto econômico da resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil. **Embrapa circular técnica** **132**, Londrina, 2017. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1074026/impacto-economico-da-resistencia-de-plantas-daninhas-a-herbicidas-no-brasil>>. Acesso em: 18 dez. 2020.
- AHRENS, W. H.; WAX, L. M.; STOLLER, E. W. Identification of triazine-resistant *Amaranthus* spp. **Weed Science**, Champaign, v. 29, p. 345-348, 1981.
- AZANIA, A. A. P. M. et al. Interferência da palha de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na emergência de espécies de plantas daninhas da família convolvulaceae. **Planta daninha**, v. 20, n. 2, p. 207-212, 2002.
- BEYAERT, R. P.; SCHOTT, J. W.; WHITE, P. H. Tillage effect on corn (*Zea mays* L.) production in a coarse-textured soil in southern Ontario. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 767-774, 2002.
- BRIGHENTI, A. M.; OLIVEIRA, M. F. Biologia de plantas daninhas. In: OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. v.1, cap. 1, p. 1-36.
- CORREIA, M. M.; DURIGAN, J. C. Emergência de plantas daninhas em solo coberto com palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 22, p. 11-17, 2004.
- COELHO, S. P. et al. Coberturas vegetais na supressão de plantas daninhas em sistema de plantio direto orgânico de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 1, p. 65-72, 2016.
- CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos na safra 2018/19**: Brasil, 2019: décimo segundo levantamento. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S.; OLIVEIRA NETO, A. M. **Buva**: fundamentos e recomendações para manejo. 1. ed. Curitiba: Omnipax, 2013. 122 p.
- CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Influência da luz e da temperatura na germinação de cinco espécies de plantas daninhas do gênero *Amaranthus*. **Bragantia**, v. 66, n. 4, 2007.
- CARBONARI, C. A.; MESCHÉDE, D. K.; CORREA, M. R.; VELINI, E. D. Eficácia do herbicida diclosulam em associação com a palha de sorgo no controle de *Ipomoea grandifolia* e *Sida rhombifolia*. **Planta daninha**, v. 26, n. 3, 2008.

CHAUHAN, B.; JOHNSON, D. Germination Ecology of Goosegrass (*Eleusine indica*): An Important Grass Weed of Rainfed Rice. **Weed Science**, v. 56, n. 5, p. 699-706, 2008.

DAUER, K. T.; MORTENSEN, D. A.; VANGESSEL, M. J. Temporal and spatial dynamics of long-distance *Conyza canadensis* seed dispersal. **Journal of applied ecology**, v. 44, n. 1, p. 105-114, 2007.

EGLEY, G. H.; DUKE, S. O. Physiology of weed seed dormancy and germination. In: DUKE, S. O. **Weed physiology: reproduction and Ecophysiology**. Florida: CRC Press, 1985. p. 27-64.

GILBERT, B.; ALVES, L. F.; FAVORETO, R. *Bidens pilosa* L. Asteraceae (Compositae; subfamília Heliantheae). **Revista Fitos**, v. 8, p. 1-72, 2013.

GAZZIERO, D. L. P. et al. Efeito da palhada de trigo na emergência de *Digitaria insularis* (capim-amargoso). In: VI CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, Cuiabá. **Anais...**Cuiabá, MT: 2012. CD-room.

GAZOLA, T. et al. Características biológicas de *Digitaria insularis* que conferem sua resistência a herbicidas e opções de manejo. **Científica**, v. 44, n. 4, pag. 557-567, 2016.

GHERSA, C. M. et al. Coevolution of agroecosystems and weed management. **BioScience**, v. 44, n. 2, p. 85-94, 1994.

GRAVENA, R. et al. Controle de plantas daninhas através da palha de cana-de-açúcar associada à mistura dos herbicidas trifloxysulfuron sodim+ametrina. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 419-427, 2004.

HEAP, I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. **WeedScience.org**, 2021. Disponível em: <<http://www.weedscience.org>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

HORAK, M. J.; LOUGHIN, T. M. Growth analysis of four *Amaranthus* species. **Weed Science**, v. 48, p. 347-355, 2000.

HOLM, L. et al. **World weeds: natural histories and distribution**. New York: John Wiley e Sons, 1997. 1129 p.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Brasil, 2017. Disponível em:<<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>> Acesso em 20 mai. 2020.

JALALUDIN, A. et al. Preliminary findings of potentially resistant goosegrass (*Eleusine indica*) to glufosinate-ammonium in Malaysia. **Weed Biology and Management**, v. 10, n. 4, p. 256–260, 2010.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**. 2. ed. São Paulo: Basf, 1999. 978 p.

KARAM, D.; MELHORANÇA, A. L.; OLIVEIRA, M. F. Plantas Daninhas na Cultura do Milho. **Embrapa circular técnica 79**. Sete Lagoas, 2006. Disponível em: <http://www.cnpms.embrapa.br/protilp/artigos/Circ_79.pdf>. Acesso em 20 jan. 2020.

KLEIN, A.; FELIPPE, G. M. Efeito da luz na germinação de sementes de ervas invasoras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 26, n. 7, p. 955-966, 1999.

MATOS, A. K. A. et al. Dinâmica de herbicidas em pré-emergência em sistemas de produção com palha. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 15, n. 1, p. 97-106, 2016.

MENDONÇA, S. G. et al. Ecofisiologia da germinação de sementes de *Digitaria insularis* (L.) Fedde. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 4, p. 823-832, 2014.

MARQUES, R. P. et al. Densidades de palha e condições de luminosidade na germinação de sementes de *Euphorbia heterophylla*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 3, p. 867-872, 2012.

MONQUERO, P. A. et al. Eficácia de herbicidas em diferentes quantidades de palha de cana-de-açúcar no controle de *Euphorbia heterophylla*. *Planta Daninha*, v. 25, n. 3, p. 613-619, 2007.

MACIEL, C. D. G.; VELINI, E. D. Simulação do caminamento da água da chuva e herbicidas em palhadas utilizadas em sistemas de plantio direto. **Planta Daninha**, v. 23, n. 3, p. 471-481, 2005.

MAYER, A. C.; POLJAKOFF-MAYBER, A. **The germination of seeds**. 4. ed. Oxford: Pergamon Press, 1989. 270 p.

NAGABHUSHANA, G. C.; WORSHAM, A. D.; YENISH, J. P. Allelopathic cover crops to reduce herbicide use in sustainable agricultural systems. **Allelopathy Journal**, v. 8, n. 2, p. 133-146, 2001.

PITELLI, R. A. Dinâmica de plantas daninhas no sistema de plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE HERBICIDAS E PLANTAS DANINHAS, 1., 1997, Dourados. **Anais...** Dourados, MS: Embrapa-CPAO, 1997. p. 50-61.

PITELLI, R. A. Plantas daninhas no sistema plantio direto de culturas anuais. **Revista de Plantio Direto**, n. 4, p. 13-18, 1998.

RIBAS, G. G. et al. Temperatura do solo afetada pela irrigação e por diferentes coberturas. **Engenharia agrícola**, v. 35, n. 5, p. 817-828, 2015.

RODRIGUES, B. N. Influência da cobertura morta no comportamento dos herbicidas imazaquin e clomazone. **Planta Daninha**, v. 11, p. 21-28, 1993.

RICE, E. L. **Allelopathy**. New York: Academic Press, 1984. 422 p.

SANTOS, B. C. et al. Sistema de plantio direto utilizando a *Bidens pilosa* com diferentes profundidades de semeadura e influência sob a qualidade fisiológica. **Brazilian journal of development**, v. 6, n. 7, p. 52202-52216, 2020.

SILVA, A. S. et al. Densidades de plantas daninhas e épocas de controle sobre os componentes de produção da soja. **Planta Daninha**, v. 26, p. 65-81, 2008.

SIMONI, F. et al. Eficácia de imazapic e sulfentrazone sobre *Cyperus rotundus* em diferentes condições de chuva e palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 769-778, 2006.

SILVA, J. R. V.; COSTA, N. V.; MARTINS, D. Efeitos da palhada de cultivares de cana-de-açúcar na emergência da *Cyperus rotundus*. **Planta Daninha**, v. 21, n. 3, p. 375-380, 2003.

SWINSCOW, T. D. V. **Statistics at square one**. 9. ed. Campbell: University of Southampton, 1997. 140 p.

TREZI, M. M.; VIDAL, R. A. Potencial de utilização de cobertura vegetal de sorgo e milho na supressão de plantas daninhas em condição de campo: II – efeitos da cobertura morta. **Planta Daninha**, v. 22, n. 1, p. 1-10, 2004.

THEISEN, G.; VIDAL, R. A. Efeito da cobertura do solo com resíduos de aveia-preta nas etapas do ciclo de vida do capim marmelada. **Planta Daninha**, v. 17, n. 2, p. 189-196, 1999.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Foreign Agricultural Service**, USA, 2020. Disponível em: <Oilseeds: World Markets and Trade | USDA Foreign Agricultural Service>. Acesso em 10 dez. 2020.

VOLL, E.; et. al. A Dinâmica das plantas daninhas e práticas de manejo. **Embrapa documentos** 260, Londrina, 2005. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/466870>>. Acesso em 04 fev. 2021.

VELINI, E. D.; NEGRISOLI, E. Controle de plantas daninhas em cana crua. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 22., 2000, Foz do Iguaçu. **Palestra...** Foz do Iguaçu, PR: SBCPD, 2000. p. 148-164.

VIDAL, R. A.; THEISEN, G. Efeito da cobertura do solo sobre a mortalidade de sementes de capim-marmelada em duas profundidades de solo. **Planta Daninha**, v. 17, p. 339-344, 1999.

VÁZQUEZ-YANES, C.; OROZCO-SEGOVIA, A. Patterns of seed longevity and germination in the tropical rainforest. **Annual Review of Ecology and Systematics**, v. 24, n. 1, p. 69-87, 1993.

WEBER, E. **Plant Species of the World**: a reference guide to environmental weeds. 2. ed. Cabi, 2017. 596 p.

WU, H.; WALKER, S. **Fleabane:** Fleabane biology and control. 2004. Disponível em: <<http://www.weeds.crc.org.au/documents/fleabane.pdf>>. Acesso em 20 out. 2020.

WU, H. et al. Germination, persistence and emergence of flaxleaf fleabane (*Conyza bonariensis* [L.] Cronquist). **Weed biology and management**, V. 7, n. 1, p. 192-199, 2007.

CAPÍTULO 2

DINÂMICA EM PALHA E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS COM 2,4-D

RESUMO

Quatro experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e laboratório entre os anos de 2019 e 2020. As hipóteses dos estudos é que o herbicida 2,4-D possui ação residual de controle em plantas daninhas e que a presença da palha de milho pode suprimir o desenvolvimento dessas plantas e também interferir na ação residual desse herbicida. Os objetivos foram avaliar o efeito da palha de milho na dinâmica de 2,4-D sal de colina, sua ação residual de controle em *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*, na ausência e presença da palha, e a relação entre a dinâmica do herbicida na palha e a eficácia de controle nas espécies. Para avaliação da lixiviação do herbicida na palha, lâminas acumuladas de chuva (5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm) foram simuladas em diferentes períodos após a aplicação de 2,4-D sal de colina (912 g e.a. ha⁻¹) e alíquotas das soluções coletadas foram quantificadas por HPLC MS/MS. Para avaliação do período residual de controle, foram realizadas curvas de dose-reposta com o mesmo herbicida aplicado na pré-emergência das plantas daninhas em solo com ausência e presença de palha. Avaliou-se número de plantas emergidas e biomassa aos 21 dias após a aplicação. A lixiviação de 2,4-D na palha aumenta em decorrência do maior volume de chuvas. Quanto maior é o período entre a aplicação do herbicida e a ocorrência da primeira chuva, menor é a quantidade final recuperada. Sem a presença de palha sobre o solo, o 2,4-D é eficaz em *Digitaria insularis*, *Conyza* spp. e *A. hybridus*. A palha de milho potencializa a ação de controle do 2,4-D, aumenta seu espectro de controle e pode prolongar seu período residual de controle. O herbicida 2,4-D apresenta potencial para ser utilizado como pré-emergente em áreas com a presença ou ausência de palha.

Palavras-chave: cobertura vegetal; cromatografia; dinâmica; eficácia; eudicotiledôneas; herbicidas auxínicos; monocotiledôneas; pré-emergência.

CHAPTER 2

DYNAMIC IN STRAW AND WEED CONTROL WITH 2,4-D

ABSTRACT

Four assays were conducted in a greenhouse and lab between years 2019 and 2020. The objectives were evaluate the effect of corn straw on the dynamics of 2,4-D choline salt, its residual control efficacy in *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* and *Eleusine indica*, in the absence and presence of straw, and the relationship between the dynamics of the herbicide in straw and the efficacy in species. To evaluate the herbicide leaching in straw, rain slides were simulated in different periods after the application of Enlist® Colex-D and aliquots of the collected solutions were quantified by HPLC MS/MS. To evaluate the herbicide residual effect, dose-response curves were performed with the same herbicide applied in the pre-emergence of weeds in soil with absence and presence of straw. Number of emerged plants and dry biomass was evaluated at 21 days after application. Leaching of 2,4-D in the straw increases due to the greater rainfall. The longer the period between the application of the herbicide and the occurrence of the first rain, the smaller the final concentration recovered. Without the presence of straw on the soil, 2,4-D is effective in *Digitaria insularis*, *Conyza* spp. and *A. hybridus*. Corn straw enhances the control action of 2,4-D, increases its control spectrum and can prolong its residual control period. The herbicide 2,4-D has the potential to be used as a pre-emergent.

Keywords: auxinic herbicides; chromatography; dicotyledonous; dynamic; efficacy; monocotyledonous; pre-emergence; vegetation cover.

2.1 INTRODUÇÃO

A introdução comercial do ácido diclorofenoxiacético (2,4-D) em 1945, revolucionou o manejo de plantas daninhas e possibilitou o desenvolvimento de vários outros herbicidas auxínicos (PETERSON et al., 2014; EPP et al., 2016; EPP et al., 2018). Esses produtos mimetizam a atividade do fitormônio ácido indol-3-acético (AIA) e são comumente utilizados para controle de espécies eudicotiledôneas em diversas culturas agrícolas (MCDOUGAL, 2018). Apesar de estar a mais de 70 anos no mercado, cerca de 161,7 milhões ha são tratados anualmente com 2,4-D, sendo superado apenas pelos herbicidas inibidores da ALS (598 milhões ha) e da EPSPS (477 milhões ha) (BUSI et al., 2018).

O sucesso no uso de 2,4-D se deve principalmente à sua eficácia, amplo espectro de controle, baixo custo e baixa evolução nos casos de plantas daninhas resistentes em comparação aos demais herbicidas (BURNSIDE et al., 1996; JUGULAM et al., 2011). Desde a sua introdução, os casos de resistência foram reportados em apenas 25 espécies daninhas (HEAP, 2021). Essa baixa evolução nos casos e a falta de novos mecanismos de ação, despertou o interesse da indústria que acabou desenvolvendo cultivares tolerantes a 2,4-D como é o caso do sistema Enlist™ da Corteva Agriscience para as culturas algodão, soja e milho (WRIGHT et al., 2010; ZHOU et al., 2016).

Um dos principais desafios no uso dessas cultivares são os frequentes relatos de fitointoxicação em culturas não alvo devido a problemas com deriva, volatilização e contaminação de tanques de pulverizadores, já que a maioria das culturas não tolerantes são extremamente sensíveis a herbicidas auxínicos (JONES et al., 2019; BUOL et al., 2019). Neste contexto, diversos estudos tem sido conduzidos para compreender esses efeitos indesejados de modo que o posicionamento agrônomo desses herbicidas ocorra da melhor forma possível (STRACHAN et al., 2010; JOHNSON et al., 2012; EGAN et al., 2014; BISH; BRADLEY, 2017; KALSING et al., 2018; MANUCHEHRI et al., 2020).

Entretanto, estudos que explorem melhor o potencial agrônomo de 2,4-D devido a seu efeito residual nos solos é escasso. Para isso, é necessário compreender também a sua dinâmica em coberturas vegetais mortas pois o sistema de semeadura direta é amplamente disseminado e está presente em cerca de 116 milhões de hectares em todo o mundo (DERPSCH et al., 2010) e, portanto, uma

quantidade substancial de 2,4-D aplicado será depositado sobre esse tipo de cobertura. A presença de palha sobre o solo altera a dinâmica dos herbicidas aplicados sobre ela, sobretudo em períodos de menores precipitações, impactando na sua ação residual de controle em plantas daninhas e na seletividade às culturas presentes e, em alguns casos, podendo também causar carryover em culturas subsequentes (VELINI et al., 2005). Além disso, as diferentes formulações de 2,4-D (ésteres, amina e colina) também podem impactar na sua dinâmica em palha, especialmente devido as alterações na pressão de vapor e, consequentemente na volatilização.

Segundo FIGUEIREDO (2015), por possuir grupos químicos menores (dois grupos metila), as formulações amina provavelmente apresentam maior “exposição” da sua carga, quando comparada com as formulações colina (três grupos metila). Assim, a amina deve interferir mais intensamente com ânions presentes no sistema, e menos intensamente com cátions. A colina, por sua vez, além de apresentar-se menos “exposta” também apresenta menor volatilidade (constante de Henry= $1,4 \times 10^{-16}$ atm m³ mol⁻¹) do que a formulação amina (constante de Henry= $8,6 \times 10^{-6}$ atm m³ mol⁻¹).

Neste sentido, a hipótese é que o herbicida 2,4-D colina seja eficaz na pré-emergência de plantas daninhas monocotiledôneas e eudicotiledôneas, e que a presença da palha altere a dinâmica do herbicida, consequentemente afetando a eficiência de controle nas espécies.

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram avaliar a dinâmica de 2,4-D colina em palha de milho, seu efeito residual em *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*, na ausência e presença de palha, e compreender a relação entre a lixiviação na palha e a ação residual nas espécies.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos entre os anos de 2019 e 2020 em casa de vegetação e laboratório no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia - NUPAM, pertencente a Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, câmpus de Botucatu, SP.

2.2.1 Dinâmica de 2,4-D colina em palha de milho

Foram conduzidos 2 experimentos para determinação da dinâmica de 2,4-D colina em palha de milho. Os tratamentos consistiram na aplicação Enlist® Colex-D (456 g e.a. L⁻¹) na concentração de 912 g e.a. ha⁻¹, seguido de simulações de chuva com lâminas acumuladas de 5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm aos 0, 1, 3, 7 e 15 dias após a aplicação do herbicida (DAA).

As unidades experimentais corresponderam a recipientes de 4,5 cm de diâmetro (cápsulas de laminado de polipropileno) devidamente preenchidos com palha, acoplados à tubos coletores com capacidade para 50 mL ou 300 mL e posicionados verticalmente sobre uma estante metálica de apoio. A palha foi obtida em folhas de plantas de milho híbridos Pioneer® P3707 VYH, Forseed® FS 587 PWU e Dekalb® DKB 345 PRO3, em estágio de senescência, coletadas em lavouras sem histórico de aplicação de herbicidas, cortadas em pequenos fragmentos de aproximadamente 0,5 x 1 cm e pesadas em balança de precisão 0,0001 g em quantidade equivalente a 5 t ha⁻¹.

Para a pulverização do herbicida, foi utilizado um pulverizador estacionário constituído por estrutura metálica que suporta uma barra de pulverização de 2 m de largura, equipada com quatro pontas XR 11002 VS, espaçadas em 0,5 m entre si e dispostas a 0,5 m de altura em relação às unidades experimentais. A barra se desloca por uma área útil de 6,0 m² no sentido do seu comprimento, e é tracionada por um motor elétrico em conjunto com um modulador de frequência que controla a velocidade de trabalho. A pressão de trabalho utilizada pelo equipamento foi de 2,0 kgf cm⁻², com velocidade de 3,6 km h⁻¹ e consumo de calda de 200 L ha⁻¹. As condições climáticas no momento das aplicações foram temperaturas 25°C e 29°C e umidade relativa 60% e 53%, para os ensaios 1 e 2, respectivamente.

Imediatamente após a aplicação, os alvos que não continham palha foram lavados com 40 ml de água destilada para posterior quantificação do total de 2,4-D depositado. Para simulação das lâminas de chuva, no mesmo pulverizador descrito foi acoplada uma segunda barra de pulverização posicionada no sentido longitudinal as unidades experimentais. A barra é constituída por dez pontas de pulverização Teejet® DG 9505 EVS, espaçadas em 6,5 cm entre si e dispostas a 0,5 m de altura em relação ao alvo. O sistema foi calibrado com pressão de trabalho de 2,0 kgf cm⁻²,

permitindo a produção de lâminas variáveis, de modo que, a cada movimento da barra de aplicação um acumulado de 2,5 mm de chuva é gerado.

Após a aplicação dos tratamentos, as unidades experimentais foram mantidas em ambiente externo sob radiação solar e protegidas por uma estrutura com cobertura de quartzo por até 15 dias após a aplicação (DAA). O quartzo foi utilizado por permitir a passagem dos comprimentos de onda ultravioleta entre 290 e 400 nm, que são as faixas responsáveis por promover a fotodegradação de herbicidas (RADOSEVICH; GHERSA; HOLT, 1997).

Para avaliação da dinâmica na palha, em cada período após a aplicação do herbicida (0, 1, 3, 7 e 15 DAA) e para cada lâmina de chuva acumulada (5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm), as soluções resultantes da transposição na palha foram mensuradas e alíquotas filtradas em filtro Millex HV (Millipore) 0,45 μ m, com membrana durapore 13 mm e acondicionados em vial âmbar 9 mm (Flow Supply) com 2 mL de capacidade para posterior análise cromatográfica (Figura 1).

Figura 1 – Capsulas com palha de milho e alvos no momento da aplicação de 2,4-D (A), simulação de chuva e coleta da solução lixiviada (B), estrutura de quartzo (C), determinação do volume de chuvas coletado (D), cromatógrafo (E) e espectrômetro (F) utilizados para quantificação do herbicida



A determinação da concentração do herbicida nas soluções foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência e espectrometria de massas (HPLC-MS/MS). O sistema foi composto por um cromatógrafo líquido de alta eficiência (Prominence UFLC, Shimadzu Corporation), acoplado a um espectrômetro de massas (4500, Triple Quad, AB Sciex) híbrido triplo quadrupolo. As condições cromatográficas para a quantificação de 2,4-D foram otimizadas para cada modo de ionização (Tabela 1). Escolheu-se o modo de ionização da fonte (eletrospray - ESI), que permite a

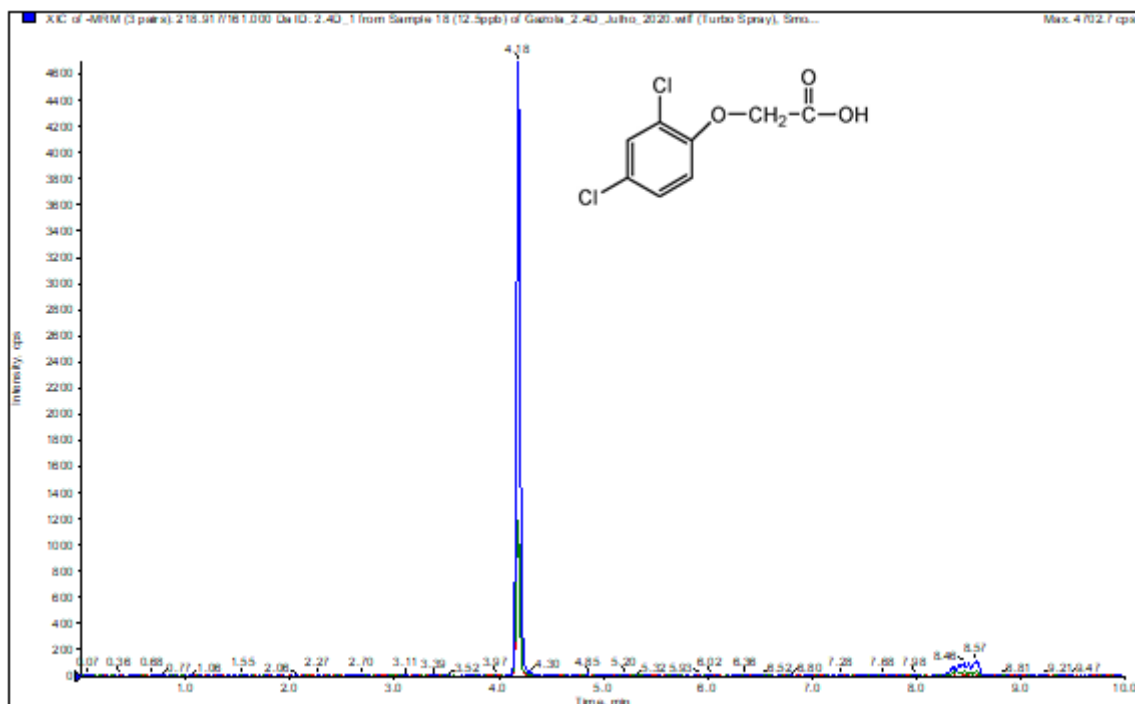
detecção e a separação do composto em uma única corrida para os modos positivo e negativo.

Tabela 1 – Condições cromatográficas utilizadas para quantificação de 2,4-D

Coluna analítica	C18 Synergi 2,5 µ Hydro RP 100 Å
Volume de injeção	20 µL
Fase móvel (pH 7,0)	Fase A (FA) = 0,1% de ácido fórmico em água Fase B (FB) = 0,1% de ácido fórmico em metanol
Gradiente	0 – 1 minuto = 40% FB e 60% FA 1 – 3 minutos = 95% FB e 5% FA 3 – 6 minutos = 95% FB e 5% FA 6 – 8 minutos = 40% FB e 60% FA 8 – 10 minutos = 40% FB e 60% FA
Fluxo	0,600 ml min ⁻¹
Temperatura do forno	40°C

O tempo total de corrida foi de 10 minutos com retenção na coluna cromatográfica de 4,18 minutos. O íon utilizado para quantificação foi o primeiro fragmento gerado a partir da molécula 2,4-D (massa molecular 218,917; Fragmentos 161,000; 124,600; 160,100). A curva analítica para o composto foi construída em faixas de concentração, sendo: equação da reta ensaio 1 -> $y = 939x + -99.6$; R^2 ensaio 1 = 0,9994; equação da reta ensaio 2 -> $y = 61.6x + -19.8$; R^2 ensaio 2 = 0,9961; curva analítica 0,3906 – 200 ng ml⁻¹. Na figura 2 está o cromatograma obtido para 2,4-D.

Figura 2 - Cromatograma obtido para 2,4-D (12,5 µg L⁻¹)



2.2.2 Efeito residual de 2,4-D colina em plantas daninhas

Foram conduzidos dois experimentos de curvas de dose-resposta para determinação da eficácia do herbicida 2,4-D colina (456 g e.a. L⁻¹) na pré-emergência das plantas daninhas *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica* na ausência e presença de palha sobre o solo, seguido por simulações de chuvas.

A quantidade de sementes de cada espécie foi padronizada pelo peso, sendo *D. insularis* 0,200 g; *Conyza* spp. 0,400 g; *B. pilosa* 0,350 g; *A. hybridus* 0,050 g; *E. heterophylla* 0,400 g; *E. indica* 0,070 g. Após pesadas, as sementes de todas as espécies foram misturadas e acondicionadas em sacos de papel para posterior semeadura em bandejas plásticas medindo 27 x 41 cm com capacidade para 7,5 L.

O solo utilizado apresentou as seguintes características físico-químicas: 281, 87 e 632 g.dm⁻³ de argila, silte e areia, respectivamente; pH (CaCl₂) = 5,3; M.O. = 11 g dm⁻³; P (resina) = 18 mg dm⁻³; Al³⁺ = 2 mmolc dm⁻³; H+Al = 40 mmolc dm⁻³; K⁺ = 0,8 mmolc dm⁻³; Ca²⁺ = 21 mmolc dm⁻³; Mg²⁺ = 9 mmolc dm⁻³; SB = 31 mmolc dm⁻³; CTC (T) = 70 mmolc dm⁻³; S = 56 mg dm⁻³ e V% = 42.

Para a semeadura, as bandejas foram preenchidas com 3,5 L de solo seco e peneirado, acomodou-se em seu centro uma moldura metálica medindo 24 x 38 cm onde as sementes foram distribuídas uniformemente em seu interior. Em seguida, realizou-se a cobertura com mais 1,5 L de solo e retirou-se cuidadosamente a moldura para que as sementes ficassem dispostas somente em sua área útil a aproximadamente 1 cm de profundidade (Figura 3). O procedimento foi necessário para garantir que o efeito físico da palha na emergência das espécies não fosse prejudicado.

A palha utilizada foi coletada em lavouras de milho híbridos Pioneer® P3707 VYH, Forseed® FS 587 PWU e Dekalb® DKB 345 PRO3, sem histórico de aplicação de herbicidas. Para isso, foram coletadas apenas as folhas presente nas plantas em estágio de senescência, cortadas em pequenos fragmentos de aproximadamente 5 x 3 cm, homogeneizadas formando uma mistura dos híbridos, e pesadas em balança de precisão na quantidade relativa a 5 t ha⁻¹.

Os tratamentos consistiram em aplicações do herbicida 2,4-D sal de colina nas dosagens 0; 57; 114; 228; 456; 912; 1824 e 3648 g e.a. ha⁻¹ seguidos por simulação de lâmina de chuva de 10 mm de acordo com cada modalidade, sendo: SP – Aplicação do herbicida diretamente sobre o solo semeado, seguido por simulação de chuva; ACP – Aplicação do herbicida diretamente sobre o solo semeado, seguido por cobertura física com a palha e simulação de chuva; ASP – Aplicação do herbicida diretamente sobre a palha recobrindo o solo semeado, seguido por simulação de chuva (Figura 3 D). Posteriormente, durante a condução dos experimentos, o tratamento SP foi irrigado cuidadosamente com 10 mm de água conforme necessidade das plantas. Os tratamentos ACP e ASP receberam nova simulação de 10 mm de chuva aos 11 DAA quando houve necessidade das plantas.

A pulverização dos tratamentos e simulação das lâminas de chuva ocorreram no mesmo simulador de pulverização e com as mesmas configurações descritas no experimento anterior. As condições climáticas no momento das aplicações foram temperaturas 26°C e 28°C e umidade relativa 61% e 55% para os ensaios 1 e 2, respectivamente.

Figura 3 – Metodologia para semeadura das espécies com aro e distribuição das sementes (A), retirada do aro e cobertura com solo (B), colocação da palha de milho sobre a parcela (C) e simulação de chuva (D)



As parcelas foram submetidas a avaliação da porcentagem de controle aos 21 dias após a aplicação do herbicida (DAA) mediante a contagem do número de plantas emergidas (NP). No primeiro experimento, foi realizada também a quantificação da massa seca da parte aérea (MSPA) para determinar a dinâmica de emergência e crescimento das plantas em função das doses do herbicida. A MSPA foi obtida mediante ao corte da parte aérea das plantas de cada espécie e secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até massa constante, para posterior pesagem em balança de precisão 0,0001g.

2.2.3 Análise estatística

Todos os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado. No ensaio de dinâmica do herbicida 2,4-D em palha, adotou-se o esquema fatorial do tipo 6 lâminas de chuva x 5 períodos de transposição na palha (0, 1, 3, 7 e 15 dias após a aplicação do herbicida), totalizando 30 tratamentos com 5 repetições. Para os ensaios de controle das plantas daninhas em pré-emergência, os experimentos foram compostos por 8 tratamentos (doses de 2,4-D colina) e 4 repetições. Satisfazendo a homogeneidade dos dados, mediante a avaliação da grandeza dos quadrados médios residuais, as réplicas experimentais de cada ensaio foram agrupadas e analisadas de forma conjunta.

Os resultados da transposição de 2,4-D em palha foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Sendo significativo, os dados das concentrações do herbicida presente nas soluções foram convertidos em porcentagem em relação ao

total aplicado e ajustados ao modelo de regressão não-linear desenvolvido por Mitscherlich (1909):

$$Y=a[1-10(-c(X+b))]$$

Em que: a , b e c correspondem aos parâmetros da equação, sendo o parâmetro a representado pela assíntota máxima da curva na qual indica o máximo de herbicida recuperado para o total de chuva acumulada, o parâmetro b corresponde ao deslocamento lateral da curva e o parâmetro c indica a concavidade da curva. O valor de Y representa o total do herbicida extraído da palha e X sugere a lâmina de chuva (mm) necessária para a movimentação do herbicida na palha.

Para compreender o comportamento das espécies quanto a emergência e crescimento em função da ação do herbicida, realizou-se a análise de correlação linear de Pearson proposta por Swinscow (1997):

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

onde: x representa os valores do número de plantas de cada espécie, y indica o teor de biomassa seca de cada espécie, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias amostrais de cada variável, Σ simboliza o somatório e r o coeficiente de determinação.

Os resultados de NP foram submetidos a análise de variância pelo teste de F. Sendo significativo, foram convertidos em porcentagem em relação as testemunhas não aplicadas e ajustados ao modelo de regressão não-linear proposto por Streibig (1988):

$$y = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{X_0}\right)^b\right]}$$

onde: y é o percentual de controle; x é a concentração do herbicida em g e.a. ha⁻¹; a é a amplitude existente entre o ponto máximo e o ponto mínimo da variável; X_0 é a

concentração do herbicida que proporciona 50% de resposta da variável; b é a declividade da curva ao redor de X_0 .

A partir das equações foram construídas as curvas de dose-resposta. Com base nos modelos ajustados, realizou-se o cálculo da concentração do herbicida que proporcionaria 80% e 90% de controle (CL_{80} e CL_{90}). Para realização do cálculo utilizou-se a seguinte equação:

$$CL_F = \left(\frac{F}{100 - F} \right)^{1/b} \cdot X_0$$

onde: F indica a CL a ser calculada (CL_{80} ou CL_{90}), b e X_0 são os parâmetros da equação de Streibig (1988).

As análises de regressão foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS Institute, version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 Dinâmica de 2,4-D colina em palha de milho

Houve diferença significativa para o teor de 2,4-D lixiviado da palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹, em função dos dias após sua aplicação e simulação de diferentes lâminas de chuva. O modelo ajustado de Mitscherlich (1909) foi adequado e apresentou alto coeficiente de determinação em todos os períodos de avaliação (Tabela 2). O parâmetro a do modelo é o máximo de 2,4-D recuperado para o total de chuva acumulada em cada situação avaliada. Portanto, diferenças mínimas finais foram observadas em relação à liberação do herbicida em cada período avaliado após 100 mm de chuva (Tabela 2).

Tabela 2 – Estimativas dos parâmetros do modelo de Mitscherlich ajustados para o teor de 2,4-D sal de colina lixiviado da palha de milho (5 t ha⁻¹) em função dos dias após sua aplicação e simulação de diferentes lâminas de chuva

Dias sem chuva	Parâmetros do modelo				Valor de F
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R ²	
0	86,3723	0	0,0485	0,9992	2656,9100**
1	76,4020	0	0,0469	0,9985	1334,6100**
3	73,3179	0	0,0500	0,9982	1147,8600**
7	66,7652	0	0,0356	0,9987	1553,2900**
15	51,7479	0	0,0381	0,9980	1003,4900**

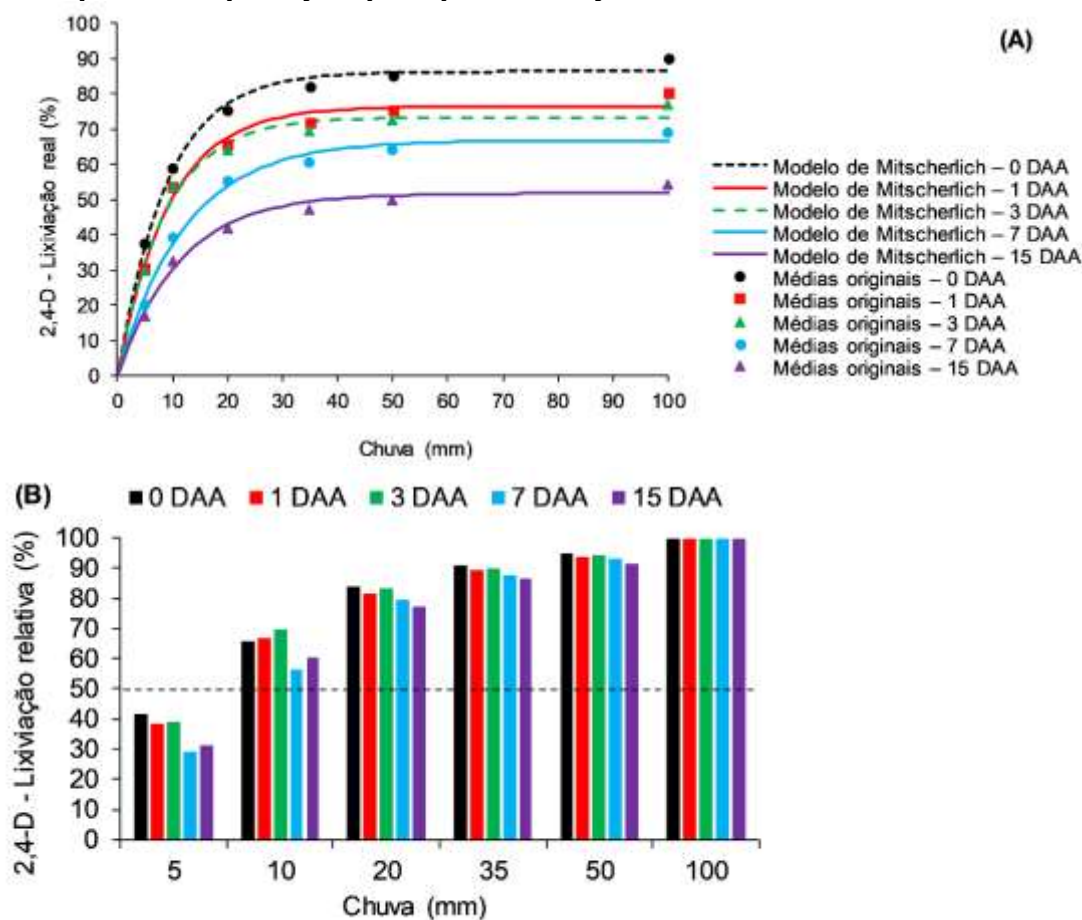
**Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F.

A aplicação de 2,4-D na palha de milho seguida por simulação de lâminas variáveis de chuva aos 0 DAA proporcionou maior transposição do herbicida, com valores de 37, 59, 75, 82, 85 e 90%, para 5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm de chuva acumulados, respectivamente (Figura 4 A). Já aos 15 DAA foi o período em que houve menor transposição de 2,4-D na palha, lixiviando 17, 32, 42, 47, 49 e 54%, nas lâminas de 5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm de chuva, respectivamente (Figura 4 A).

Com a ocorrência de 5 mm de chuva aos 0, 1, 3, 7, e 15 DAA, a disponibilização de 2,4-D foi de 37, 30, 29, 20 e 17%, respectivamente (Figura 4 A). Já com 100 mm de chuva nestes mesmos períodos, a disponibilização do herbicida foi de 90, 80, 76, 69 e 54% (Figura 4 A). Portanto, quando a aplicação de 2,4-D ocorreu em períodos de chuvas intensas, os efeitos de retenção na palha não foram tão pronunciados quando comparado a aplicação em períodos com chuvas de menores volumes. Entretanto, quanto mais tempo demora para ocorrer as primeiras lâminas de chuva, maior é a quantidade de água necessária para que a transposição aconteça e menor é a quantidade final de 2,4-D que chegará ao solo (Figura 4 A).

De maneira geral, os primeiros 10 mm de chuva foram os mais importantes em termos de lixiviação de 2,4-D na palha, pois proporcionalmente disponibilizou a maior concentração do herbicida, independentemente do período em que ela ocorreu (Figura 4 B).

Figura 4 – Porcentagem de 2,4-D sal de colina lixiviado na palha de milho em relação ao total aplicado (A) e relativo à lâmina de 100 mm (B) em função dos dias após sua aplicação (DAA) e simulação de diferentes lâminas de chuva



Diversos autores também relataram a importância da intensidade e época de ocorrência das primeiras chuvas após aplicação de vários outros herbicidas no processo de lixiviação em palha (RODRIGUES, 1993; FORNAROLLI et al., 1998; MACIEL; VELINI, 2005; CAVENAGHI et al., 2007; CARBONARI et al., 2009; TOFOLI et al., 2009; CARBONARI et al., 2010; ROSSI et al., 2013; CARBONARI et al., 2016). Contudo, não há estudos disponíveis na literatura que avaliam esse efeito da palha de milho na dinâmica de 2,4-D. Portanto, os resultados obtidos nesses experimentos preenchem essa lacuna e são importantes já que o uso de 2,4-D será intensificado nos próximos anos devido a liberação comercial das cultivares de algodão, milho e soja tolerantes (WRIGHT et al., 2010; ZHOU et al., 2016).

A recomendação de uso do 2,4-D é na pós-emergência das plantas, porém esse herbicida também possui ação residual nos solos. Na pré-emergência, as características físico-químicas dos herbicidas, a presença e as características da cobertura vegetal (origem, nível de envelhecimento, quantidade e distribuição) e o

regime de chuvas que ocorrerem após a aplicação atuarão na interceptação desses herbicidas na palha interferindo diretamente na sua disponibilidade para o solo (SELIM et al., 2003; LAMOREAUX et al., 1993; RODRIGUES, 1993; WATTS; HALL, 1996). Outro fator importante que explica a diminuição da lixiviação de herbicidas em palha é a degradação do produto que pode ocorrer principalmente por fotólise e/ou volatilização (LOCKE; BRYSON, 1997).

Para que a fotodegradação de uma molécula herbicida ocorra, sua absorbância máxima precisa ocorrer em comprimentos de onda na faixa de 290 a 400 nanômetros (nm), isso porque os comprimentos abaixo de 290 nm são absorvidos pela camada de ozônio e praticamente não chegam a superfície terrestre e maiores que 400 nm não possuem energia suficiente para promover a quebra das moléculas (REICHARDT, 1996; WATKINS, 1974; RADOSEVICH; GHERSA; HOLT, 1997). O 2,4-D não é uma molécula que sofre fotodegradação em condições ambientais, os relatos de literatura indicam que sua absorbância máxima de luz ocorre nos comprimentos de onda de 220, 230 e 283 nm (BAILEY; WHITE, 1964; LEWIS et al., 2016; DADAZIO, 2018).

Já para ocorrer volatilização, a pressão de vapor (PV) e solubilidade do herbicida, bem como as condições de temperatura e umidade, presença de plantas, cobertura vegetal morta e o próprio solo tratado devem influenciar nesse processo. Formulações ésteres 2,4-D são considerados de alta volatilidade com PV entre $2,3 \times 10^{-3}$ a $3,0 \times 10^{-4}$ mm Hg a 25°C e as formulações amina são consideradas de baixa volatilidade com PV de $5,5 \times 10^{-7}$ mm Hg a 25°C (CAMPBELL, 1997). Já a formulação mais atual, denominada sal de colina, é tida como ainda menos volátil que as formulações amina (SOSNOSKIE et al., 2015).

Estudos avaliando a resposta do algodão a volatilização de 2,4-D nas formulações amina e colina na dose de 2,2 kg e.a. ha⁻¹, demonstraram que a cultura apresentou menos de 2% de injúria com a formulação amina, e com a formulação colina não houve injúrias quando os vasos com algodão foram deixados em condição de campo durante 48 horas a 1,5 e 3 m de distância do local de aplicação do herbicida (SOSNOSKIE et al., 2012). Outros estudos em túneis de plástico sob condições de campo demonstraram níveis de injúria de 76%, 13%, e 5% em algodão exposto a 2,4-D nas formulações éster, amina e colina, respectivamente (SOSNOSKIE et al., 2015).

Bauerle et al. (2015) avaliaram a volatilização de 2,4-D nas formulações mais antigas (amina e éster) em tomate e algodão em condições de campo e concluíram que a volatilidade de 2,4-D pode contribuir com a intoxicação em culturas sensíveis, entretanto a exposição oriunda da volatilização é muito menos importante quando comparada com a contaminação de tanques e deriva física. Neste sentido, é pouco provável que os eventuais níveis de volatilização de 2,4-D sal de colina, que possam ter ocorrido na palha de milho, justifiquem a elevada redução na taxa de lixiviação observada neste experimento, principalmente nos menores volumes de chuva e nos maiores períodos sem a ocorrência das primeiras precipitações (Figura 4 A).

A explicação mais plausível é que a quantidade de herbicida que não lixiviou pela palha de milho possa ter sido retida nesse material. Sabe-se que quanto maior a solubilidade em água, maior é a capacidade de um herbicida transpor a cobertura vegetal e atingir o solo (CORREIA; REZENDE, 2002). O herbicida 2,4-D possui elevada solubilidade em água (24.300 mg L^{-1} a 20°C) (LEWIS et al., 2016) e, ainda assim, com 100 mm de chuva aos 15 DAA, apenas 54% do herbicida lixiviou na palha (Figura 4 A). Uma possível explicação é que no processo de envelhecimento da cobertura morta ocorre a degradação de lignina e celulose da parede celular; esse processo expõe as cargas presentes na palha e conseqüentemente aumenta-se a retenção do herbicida devido à maior superfície de contato (DAO, 1991; REDDY et al., 1995).

A maior persistência de 2,4-D em palha de milho pode trazer benefícios para o manejo de plantas daninhas, prolongando seu efeito residual de controle em função da liberação gradativa para o solo conforme as chuvas vão acontecendo. Entretanto, o período de ausência de chuvas após a aplicação do herbicida não pode ser muito longo pois, quanto maior ele é, menor será a concentração final lixiviada (Figura 4 A) podendo interferir na eficácia de controle das plantas. Além disso, 100 mm de chuva acumulado parece promover a máxima liberação possível de herbicidas aplicados sobre a palha, sendo pouco provável que ocorra nova liberação em função de posteriores precipitações. Carbonari et al. (2016) avaliando sulfentrazone, outro herbicida ácido fraco de elevada solubilidade, aplicado na dose de $750 \text{ g i.a. ha}^{-1}$ sob 10 t ha^{-1} de palha de cana e simulação de um acumulado de 100 mm de chuva aos 1, 30 e 60 dias após sua aplicação, seguido de nova simulação de 20 mm de chuva aos 7 e 14 dias após a ocorrência dos primeiros 100

mm, verificaram que a quantidade máxima do herbicida que novamente foi liberada da palha foi de apenas 0,05%.

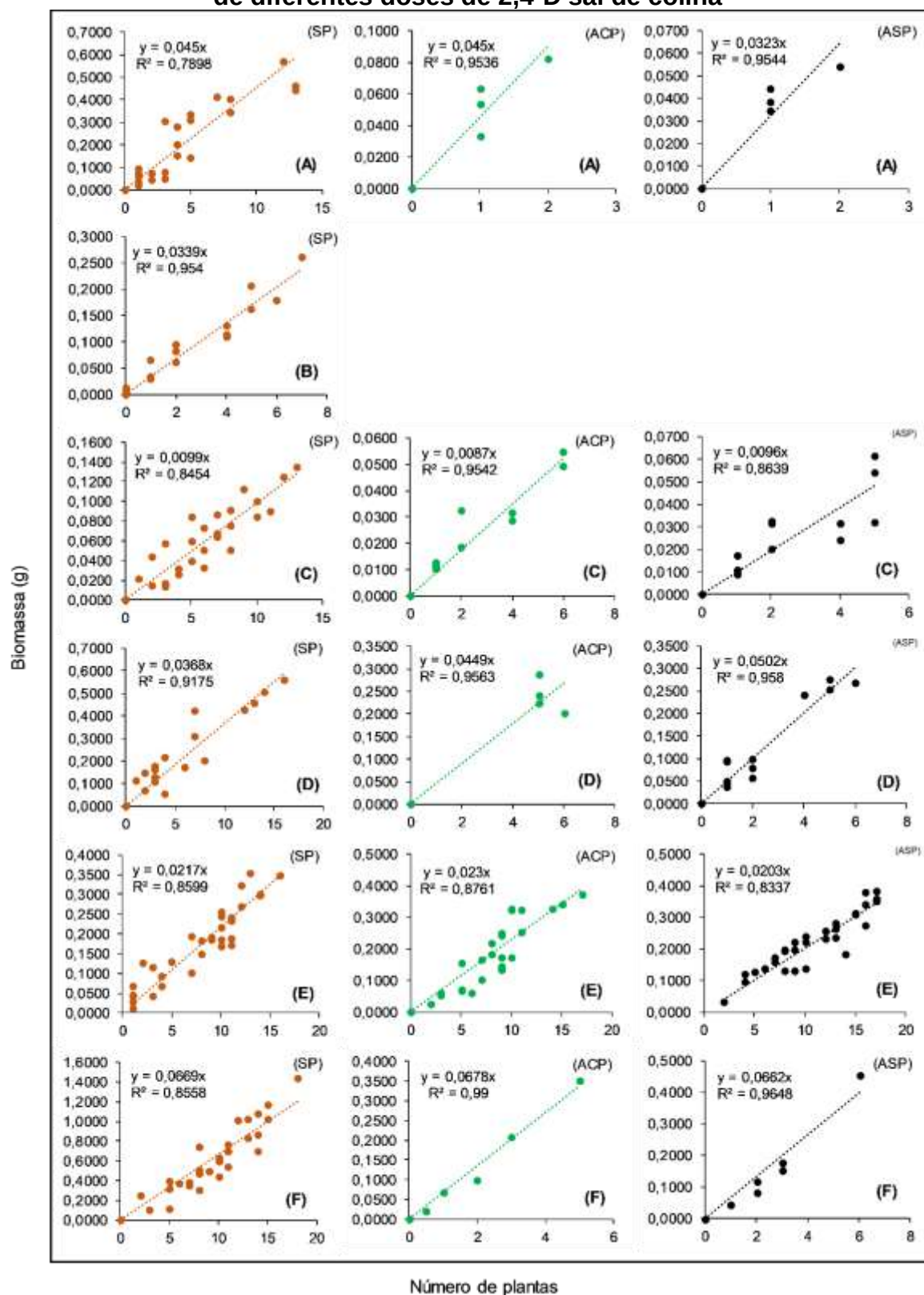
Em situações como essas pode haver comprometimento da eficácia do herbicida e ajustes nas doses podem ser necessários, principalmente porque 2,4-D tem meia vida curta nos solos (1,7 a 13,1 dias) (WILSON et al., 1997). Por outro lado, a retenção parcial de 2,4-D na palha poderá reduzir seu movimento lateral e descendente no solo (REDDY et al., 1995). Trinta estudos realizados em diversas áreas nos EUA mostraram que além da baixa persistência de 2,4-D nos solos, sua mobilidade é limitada (solos argilosos 15 a 30 cm, solos com baixo teor de matéria orgânica 40 a 60 cm), sendo pouco provável que o herbicida contamine o lençol freático (WILSON et al., 1997). Portanto, a presença de palha sobre o solo pode contribuir positivamente nessa questão e tornar o uso de 2,4-D ainda mais seguro.

2.3.2 Efeito residual de 2,4-D colina em plantas daninhas

Análises de correlação foram utilizadas para determinar qual variável seria mais adequada para diagnosticar o efeito de controle (Figura 5). Em ensaios de eficácia diversos autores utilizam a biomassa vegetal ou realizam análise visuais de sintomas para aferir o efeito de herbicidas no controle das plantas daninhas (SANCHOTENE et al., 2017; TROPALDI et al., 2017; TROPALDI et al., 2018; SANTIAGO et al., 2018; FERREIRA et al., 2020). Entretanto, a simples contagem do número de plantas presentes, desde que em situações controladas, pode ser um parâmetro importante e confiável para definir níveis de controle para alguns herbicidas aplicados na pré-emergência.

A alta correlação observada demonstrou que, em todas as espécies avaliadas independentemente da presença ou ausência de palha recobrindo o solo, o aumento do número de plantas presentes se refletiu em maior acúmulo de biomassa (Figura 5). Isso demonstra que na pré-emergência, o herbicida 2,4-D atua preferencialmente nas sementes em processo de emergência e sua ação de controle não permite a emergência das plantas. As que foram capazes de emergir não apresentaram sintomas do herbicida e conseguiram se desenvolver normalmente, explicando a elevada correlação observada (Figura 5).

Figura 5 – Correlação entre a biomassa e o número de plantas de *Digitaria insularis* (A), *Conyza* spp. (B), *Bidens pilosa* (C), *Amaranthus hybridus* (D), *Euphorbia heterophylla* (E) e *Eleusine indica* (F) aos 21 dias após a aplicação de diferentes doses de 2,4-D sal de colina



SP = aplicação sobre o solo sem palha; ACP = aplicação sobre o solo seguida por cobertura com palha; ASP = aplicação sobre a palha recobrindo o solo

Portanto, para o herbicida 2,4-D, as duas variáveis analisadas são confiáveis para avaliar o nível de eficácia nas plantas daninhas, justificando o uso do número de plantas para tal finalidade nestes experimentos. Nota-se que houve diferença significativa de controle para cada espécie testada e o modelo log-logístico de Streibig (1988) foi considerado adequado para a interpretação dos resultados já que apresentou elevados coeficientes de determinação para todas as espécies e modalidades de aplicação do herbicida (Tabela 3).

Tabela 3 - Valores estimados de CL₅₀, CL₈₀, CL₉₀ e coeficiente de determinação utilizando a análise de regressão não linear do tipo log-logístico proposto por Streibig, 1988^a

Espécies/ Modalidade de aplicação^c	CL₅₀^b	CL₈₀^b	CL₉₀^b	R²
<i>Digitaria insularis</i> SP	107,1730	367,2140	754,7010	0,9924
<i>Digitaria insularis</i> ACP	0,0418	0,0843	0,1271	0,8347
<i>Digitaria insularis</i> ASP	0,0390	0,0787	0,1186	0,8759
<i>Conyza</i> spp. SP	65,9158	179,7220	323,1610	0,9995
<i>Bidens pilosa</i> SP	242,2400	1056,9500	2505,1800	0,8843
<i>Bidens pilosa</i> ACP	17,1909	56,4763	113,2500	0,8957
<i>Bidens pilosa</i> ASP	18,5254	117,3980	345,7290	0,8035
<i>Amaranthus hybridus</i> SP	61,6281	156,3080	269,4170	0,9421
<i>Amaranthus hybridus</i> ACP	0,0290	0,0591	0,0896	0,9603
<i>Amaranthus hybridus</i> ASP	36,3610	90,8216	150,3630	0,9243
<i>Euphorbia heterophylla</i> SP	657,7350	1959,1900	3709,9200	0,9030
<i>Euphorbia heterophylla</i> ACP	507,0580	1371,3200	2454,0800	0,8608
<i>Euphorbia heterophylla</i> ASP	1579,6800	7470,9000	18539,900	0,9922
<i>Eleusine indica</i> SP	732,8580	3491,5300	8701,9600	0,9987
<i>Eleusine indica</i> ACP	12,8008	31,8032	54,1587	0,9997
<i>Eleusine indica</i> ASP	17,4681	71,0185	161,3200	0,9950

^aModelo: $y = a/(1+(x/x_0)^b)$. ^bCL₅₀, ^bCL₈₀, ^bCL₉₀ (dose de 2,4-D sal de colina em g e.a. ha⁻¹ necessária para promover 50%, 80% e 90% de controle, respectivamente). ^cSP = aplicação do herbicida diretamente sobre o solo sem posterior cobertura com palha; ACP = aplicação de 2,4-D sobre o solo seguida por cobertura com palha; ASP = aplicação de 2,4-D sobre a palha recobrindo o solo. Todos seguidos por simulação de 10 mm de chuva.

Digitaria insularis apresentou elevada sensibilidade a ação de 2,4-D em sua pré-emergência. Sem a presença de palha e com posterior simulação de chuva de 10 mm (SP), 367,21 g e.a. ha⁻¹ foi suficiente para promover 80% de controle (Tabela 3) e com a dose comercial (912 g e.a. ha⁻¹) o nível de eficácia chegou próximo de 90 % (Figura 6 C). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 88% de controle (Figura 6 A). Quando 2,4-D foi aplicado no solo com posterior cobertura com a palha seguido por simulação de 10 mm de chuva (ACP), ou quando a aplicação ocorreu diretamente sobre a palha de milho

seguido por simulação de 10 mm de chuva (ASP), 57 g e.a. ha⁻¹ do herbicida foi suficiente para promover 100% de controle (Figura 6 C).

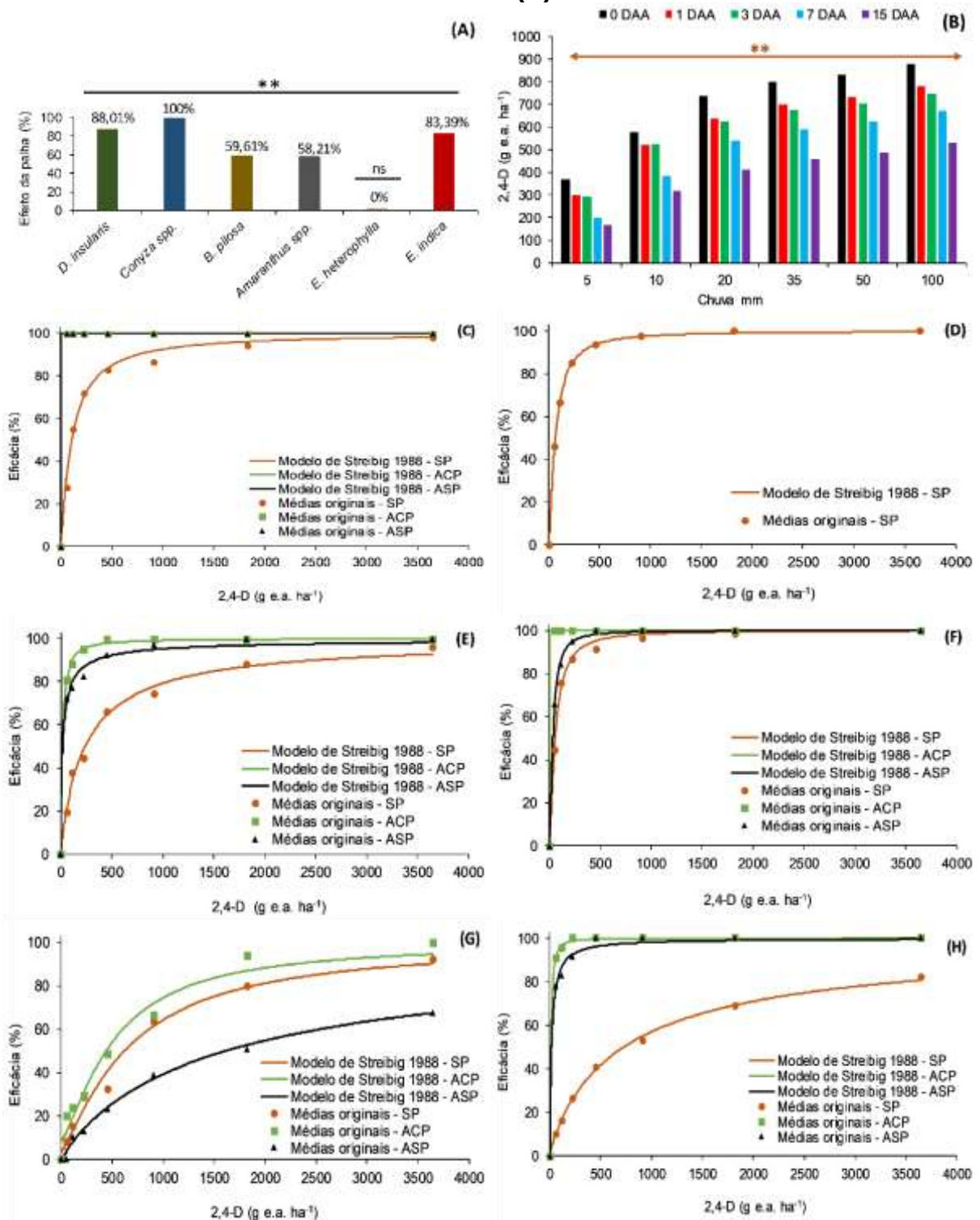
Conyza spp. também foi bastante sensível a aplicação de 2,4-D em pré-emergência. Na aplicação SP, 179,72 e 323,16 g e.a. ha⁻¹ foram suficientes para promover 80 e 90% de controle, respectivamente (Tabela 3) e com a dose comercial (912 g e.a. ha⁻¹) o nível de eficácia chegou próximo de 100% (Figura 6 D). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 100% de controle (Figura 6 A).

Para a espécie *Bidens pilosa*, a ação de 2,4-D em sua pré-emergência não foi eficiente sem a presença de palha. Na aplicação SP, foi necessário 1056,95 g e.a. ha⁻¹ para promover 80% de controle (Tabela 3 e Figura 6 E). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 59,61% de controle (Figura 6 A). Quando 2,4-D foi aplicado em ACP, 56,47 e 113,25 g e.a. ha⁻¹ foram suficientes para promover 80 e 90% de controle, respectivamente (Figura 6 E). Já quando a aplicação de 2,4-D ocorreu em ASP, 117,39 e 345,72 g e.a. ha⁻¹ foram necessários para obter os mesmos 80 e 90% de controle, respectivamente (Tabela 3 e Figura 6 E).

Amaranthus hybridus foi outra espécie bastante sensível a 2,4-D em sua pré-emergência. Na aplicação SP, foi necessário apenas 228 g e.a. ha⁻¹ para promover 86% de controle (Tabela 3 e Figura 6 F). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 58,21% de controle (Figura 6 A). Quando 2,4-D foi aplicado em ACP, 56,47 g e.a. ha⁻¹ foi suficiente para promover 100% de controle (Figura 6 F). Já quando a aplicação de 2,4-D ocorreu em ASP, foi necessário 456 g e.a. ha⁻¹ para obter os mesmos 100% de controle (Tabela 3 e Figura 6 F).

A espécie *Euphorbia heterophylla* foi a menos sensível a ação de 2,4-D em sua pré-emergência. Na aplicação SP, foi necessário 1959,19 g e.a. ha⁻¹ para obter 80% de controle (Tabela 3 e Figura 6 G). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida não promoveu efeito de controle (Figura 6 A). Quando 2,4-D foi aplicado em ACP, foi necessário 1371,32 g e.a. ha⁻¹ para promover 80% de controle (Tabela 3, Figura 6 G). Já quando a aplicação ocorreu em ASP foi necessário 7470,90 g e.a. ha⁻¹ para obter o mesmo efeito de controle (Tabela 3, Figura 6 G).

Figura 6 – Efeito físico da palha (A), dinâmica (B) e eficácia de 2,4-D sal de colina na pré-emergência de *Digitaria insularis* (C), *Conyza* spp. (D), *Bidens pilosa* (E), *Amaranthus hybridus* (F), *Euphorbia heterophylla* (G) e *Eleusine indica* (H)



SP = aplicação de 2,4-D sobre o solo sem posterior cobertura com palha; ACP = aplicação de 2,4-D sobre o solo seguida por cobertura com palha; ASP = aplicação de 2,4-D sobre a palha recobrando o solo; todos seguidos por simulação de chuva de 10 mm. DAA = dias após a aplicação. ns Não significativo e ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F.

Diferentemente de *D. insularis*, a monocotiledônea *Eleusine indica* não foi bem controlada pela ação de 2,4-D em sua pré-emergência sem a presença de palha. Na aplicação SP, foi necessário 3491,53 g e.a. ha⁻¹ para promover 80% de controle (Tabela 3 e Figura 6 H). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 83,39% de controle (Figura 6 A). Quando 2,4-D foi aplicado em ACP, 31,80 e 54,15 g e.a. ha⁻¹ foram suficientes para promover 80 e 90% de controle, respectivamente (Tabela 3 e Figura 6 H). Já quando a aplicação de 2,4-D ocorreu em ASP, 71,01 e 161,32 g e.a. ha⁻¹ foram necessários para obter os mesmos efeitos de controle (Tabela 3 e Figura 6 H).

De um modo geral, nota-se que em todas as espécies avaliadas, na aplicação ASP as concentrações do herbicida necessárias para controlá-las foram sempre superiores em comparação a aplicação em ACP (Figura 5 C, D, E, F, G, H). Isso ocorreu porque em ASP o 2,4-D precisou lixiviar pela palha de milho até chegar à solução do solo. Ao analisar sua dinâmica em palha com simulação de 10 mm de chuva logo após sua aplicação em dose comercial (mesma lâmina de chuva simulada nesses experimentos de eficácia), apenas 575,82 g e.a. ha⁻¹ (59,07%) conseguiu transpor a cobertura vegetal (Figura 6 B). Entretanto, essa menor lixiviação não implica em ajuste de maior dose do produto já que em todos os casos onde a cobertura vegetal esteve presente, com exceção de *E. heterophylla*, essa concentração foi suficiente para exercer efeito de controle acima de 90% nas espécies avaliadas (Figura 6 C, D, E, F, G, H).

Especificamente para *E. heterophylla*, esperava-se também que o resultado de ACP e SP fossem semelhantes já que não houve efeito físico da palha na sua supressão e o herbicida não precisou transpor a palha. Contudo, nota-se que na ACP foi necessária uma concentração 30% menor de 2,4-D para obter os mesmos 80% de controle observados em SP (Tabela 3, Figura 6 G). Isso significa que a palha de milho potencializou a ação do herbicida, provavelmente devido a liberação de compostos químicos como açúcares, proteínas, aminoácidos e ácidos orgânicos presentes que permitiram a maior absorção do 2,4-D e, conseqüentemente, maior ação de controle nas plantas daninhas. Provavelmente esse efeito também ocorreu para as demais espécies avaliadas, contudo não foi possível determiná-lo isoladamente já que a palha exerceu supressão de controle nessas plantas (Figura 6 A).

Um ponto importante a ser considerado, é a necessidade da ocorrência de chuvas após a aplicação de 2,4-D em pré-emergência para que o produto chegue à solução do solo e exerça sua ação herbicida. Normalmente quando a dessecação é realizada em conjunto com outros herbicidas pós-emergentes, é necessário que chuvas já tenham ocorrido previamente para que as condições fisiológicas das plantas daninhas sejam adequadas e não prejudiquem a ação dos produtos. Entretanto, esse é um aspecto positivo que flexibiliza seu posicionamento pré-emergente já que a ocorrência de chuvas imediatamente após sua aplicação não prejudicará a ação de controle, pois o foco não são as plantas e sim o efeito residual nas sementes presentes no solo.

Para o agricultor que dessecar sua área após a colheita do milho com o herbicida 2,4-D em dose comercial (912 g e.a. ha⁻¹) visando o manejo em pré-emergência das plantas daninhas, chuvas de menor intensidade (5 a 35 mm) que ocorrerem até os 15 DAA é capaz de disponibilizar entre 167 a 799 g e.a ha⁻¹ (17 a 82%) na solução do solo. Essa faixa de concentração, juntamente com a presença de 5 t ha⁻¹ de palha, é mais que suficiente para controlar todas as espécies avaliadas, exceto para *E. heterophylla* onde 2,4-D não foi efetivo e a palha não exerceu supressão de controle (Figura 6). Além disso, nesta condição ainda restam cerca de 18 a 83% de 2,4-D com potencial de ser novamente lixiviado pela palha com a ocorrência de novas chuvas.

Na presença de palha, 25% da dose comercial de 2,4-D (228 g e.a. ha⁻¹) é suficiente para exercer controle acima de 80% nas espécies avaliadas, exceto em *E. heterophylla* (Figura 6, B, C, D, E, F, G, H). Portanto, chuvas de menores intensidades que ocorrerem após sua aplicação sobre a cobertura vegetal tem potencial de prolongar o período residual de controle nas plantas daninhas avaliadas, desde que a concentração de 2,4-D que chegar ao solo seja ao menos 25% da dose comercial.

Já a ocorrência de chuvas intensas (100 mm) nos primeiros 15 DAA disponibilizarão entre 54 e 90% de 2,4-D (531 a 877 g e.a. ha⁻¹) (Figura 6 B). Nessa situação o período residual provavelmente não será prolongado pois aparentemente esse volume de chuvas promove a máxima liberação possível de herbicidas aplicados sobre a palha (CARBONARI et al. 2016). Além disso, se esse elevado volume de chuvas ocorrer de uma só vez, pode haver lixiviação abaixo dos primeiros centímetros do solo e prejudicar o controle das plantas daninhas que estão aptas a

iniciarem o processo germinativo. Isso porque 2,4-D possui elevada solubilidade em água (24.300 mg L⁻¹) e apresenta baixo coeficiente de sorção nos solos (KoC 39,3) (LEWIS et al., 2016). Nesta situação, o controle de plantas daninhas poderá ficar prejudicado.

Experimentos que avaliam o efeito residual de 2,4-D em plantas daninhas são extremamente raros. O único relato encontrado em literatura descreve que 2,4-D aplicado repetidamente, sempre que as condições para emergência das plantas de *Convolvulus arvensis* eram favoráveis, foi capaz de reduzir significativamente sua emergência (WIESE; REA, 1959).

Controlar plantas daninhas na pré-emergência é uma das melhores opções para evitar a matocompetição e mitigar os casos de resistência a herbicidas. Ao impedir o crescimento e desenvolvimento das plantas, evita-se a dispersão de propágulos e, conseqüentemente, o aumento da infestação na área. Permite incluir novos mecanismos de ação no sistema de cultivo, também contribuindo com a diminuição da evolução da resistência, e garantindo maior período de controle devido sua ação residual. Além disso, elimina-se a necessidade de ajuste de dose em função da presença de plantas daninhas em estádios mais avançados de desenvolvimento no momento da aplicação, contribuindo com a eficácia do produto.

Neste sentido, esses resultados evidenciaram que 2,4-D tem potencial para ser utilizado na pré-emergência das plantas daninhas, inclusive contribuindo com o manejo de espécies monocotiledôneas, o que não ocorre quando se utiliza-o em pós-emergência. Essa informação é de grande importância devido a elevada infestação de *D. insularis* e *E. indica* que ocorre em regiões agrícolas do Brasil, principalmente devido à resistência múltipla aos herbicidas inibidores da EPSPS e da ACCase (HEAP, 2021) e pela falta de novos produtos que as controlem eficientemente em pós-emergência.

O herbicida 2,4-D em pós-emergência atua exclusivamente em eudicotiledôneas por não ser bem translocado nas gramíneas e por elas serem capazes de metaboliza-lo rapidamente em compostos não fitotóxicos (ácido 2,5-dicloro-4-hidroxifenoxiacético e ácido 2,3-dicloro-4-hidroxifenoxiacético) de forma irreversível (HATZIOS; PENNER, 1982; STERLING; HALL, 1997; PETERSON et al., 2016). Como discutido anteriormente, a ação em pré-emergência desse produto aconteceu nas sementes em processo de germinação pois houve elevada correlação entre o número de plantas emergidas e a biomassa (Figura 5) e as

plantas que emergiram não apresentaram sintomas de fitointoxicação. Neste sentido, a elevada eficácia na pré-emergência de *D. insularis* pode estar relacionada com a ausência de metabolização do herbicida durante a germinação ou até mesmo a metabolização pode ter acontecido em níveis reduzidos, já que *E. indica* não foi bem controlada na pré-emergência.

Outra possível explicação é que o 2,4-D pode ter interrompido a divisão celular e/ou aumentado a produção de ácido abscísico (ABA), ambos impedindo que as reservas digeridas nas sementes fossem assimiladas para formação de novos tecidos, protrusão da raiz primária e formação da plântula. Em níveis elevados de auxina não ocorre a expressão dos genes necessários para que a célula evolua da fase G1 (síntese de proteínas e crescimento) para a fase S (duplicação do DNA) (DE VEYLLDER et al., 2003; DEWITTE; MURRAY, 2003), e também ativa genes que codificam as proteínas responsáveis pela biossíntese de etileno e superprodução de ABA (BADESCU; NAPIER, 2006; TAN et al., 2007; GROSSMANN, 2010; SAUER et al., 2013). ABA inibe a germinação ao reprimir a síntese de enzimas hidrolíticas que são essenciais para a quebra das reservas da semente durante o processo (BEWLEY; BLACK, 1994; TAIZ; ZEIGER, 1998).

Portanto, para o herbicida 2,4-D o regime de chuvas que ocorrer após sua aplicação afetará diretamente sua ação residual, especialmente em áreas onde há presença de palha, podendo inclusive prolongar sua ação residual de controle caso os volumes sejam de baixa intensidade. A palha, embora tenha reduzido a quantidade de 2,4-D que chegou ao solo (Figura 6 B), não prejudicou sua ação de controle nas espécies avaliadas pois exerceu efeito físico de supressão (Figura 6 A) e melhorou a ação do herbicida provavelmente devido a liberação de compostos químicos (Figura 6 G). Entretanto, estudos oficiais em condições de campo precisam ser conduzidos para que essa modalidade de aplicação e efeito em gramíneas possa ser incluído na bula dos produtos comerciais.

2.4 CONCLUSÕES

A persistência de 2,4-D sal de colina em palha de milho é alta e sua lixiviação aumenta em decorrência do maior volume de chuvas.

Quanto maior o período entre a aplicação de 2,4-D sal de colina sobre a palha de milho e a ocorrência da primeira lâmina de chuva, menor é a quantidade lixiviada,

independentemente do volume de chuvas. Contudo, a dose comercial não necessita de ajuste já que a concentração lixiviada é suficiente para exercer efeito de controle nas espécies avaliadas, com exceção de *E. heterophylla* que não é bem controlada com o herbicida.

Sem a presença de palha sobre o solo, a dose comercial de 2,4-D sal de colina é eficaz na pré-emergência de *Digitaria insularis*, *Conyza* spp. e *Amaranthus hybridus*.

A presença da palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ sobre o solo amplia o espectro de controle de 2,4-D sal de colina e melhora sua eficácia. Além disso pode prolongar seu período residual de controle desde que o volume de chuvas não seja elevado.

O 2,4-D sal de colina apresenta ação residual importante no manejo integrado de plantas daninhas e a presença de palha, bem como o regime de chuvas que ocorrem após sua aplicação, tem influência direta nesse processo.

REFERÊNCIAS

- BUOL, J. T. et al. Effect of growth stage on cotton response to a sublethal concentration of dicamba. **Weed Technology**, v. 33, p. 1-8, 2019.
- BUSI, R. et al. Weed resistance to synthetic auxin herbicides. **Pest Management Science**, v. 74, p. 2265-2276, 2018.
- BISH, M. D.; BRADLEY, K. W. Survey of Missouri pesticide applicator practices, knowledge, and perceptions. **Weed Technology**, v. 31, n. 1, p. 165–177, 2017.
- BAUERLE, M. J. et al. Field evaluation of auxin herbicide volatility using cotton and tomato as bioassay crops. **Weed technology**, v. 29, p. 185-197, 2015.
- BADESCU, G. O.; NAPIER, R. M. Receptors for auxin: will it all end in TIRs. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 217–223, 2006.
- BURNSIDE, O. C. The history of 2,4-D and its impact on development of the discipline of weed science in the United States. In: BURNSIDE, O. C. (Coord.). **Biologic and economic assessment of benefits from use of phenoxy herbicides in the United States**: Washington: U.S. Department of Agriculture, 1996. p. 5-16.
- BEWLEY, J. D., BLACK, M. **Seeds: Physiology of Development and Germination**. 2. ed. New York: Plenum Press, 1994. 445 p.
- BAILEY, G. W.; WHITE, J. L. Review of adsorption and desorption of organic pesticides by soil colloids, with implications concerning pesticide bioactivity. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 12, n. 4, p. 324-332, 1964.
- CARBONARI, C. A. et al. Dynamics of sunfentrazone applied to sugarcane Crop residues. **Weed Science**, v. 64, n. 1, p. 201-206, 2016.
- CARBONARI, C. A. et al. Efeitos de períodos de permanência de clomazone + hexazinona no solo e na palha de cana-de-açúcar antes da ocorrência de chuvas na eficácia de controle de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 197-205, 2010.
- CARBONARI, C. A. et al. Efeitos de períodos de permanência do flumioxazin no solo e na palha de milho e aveia na eficácia de controle de plantas daninhas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 8, n. 3, p. 85-95, 2009.
- CAVENAGHI, A. L. et al. Dinâmica do herbicida amicarbazone (Dinamic) aplicado sobre palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Planta Daninha**, v. 25, n. 4, p. 831- 837, 2007.
- CORREIA, N. M.; REZENDE, P. M. Manejo integrado de plantas daninhas na cultura da soja. **Boletim Agropecuário** 51, Lavras, 2002. 55 p. Disponível em: <<http://www.editora.ufla.br/upload/boletim/tecnico/boletim-tecnico-51.pdf>>. Acesso em 08 jan. 2021.

CAMPBELL, P. J. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D), salts and esters. **Inchem**, Lyon, 1997. p. 253 - 346. Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/jmpr/jmpmono/v097pr16.htm>>. Acesso em: 22 out. 2020.

DADAZIO, T. S. **Obtenção e análise de espectros de absorção de luz por herbicidas**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

DERPSCH, T. F.; KASSAM, A.; LI, K. H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.3, n.1, p. 1-25, 2010.

DEWITTE, W.; MURRAY, J. A. The plant cell cycle. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 54, n. 3, p. 235–264, 2003.

DE VEYLDER, L.; JOUBES, J.; INZE, D. Plant cell cycle transitions. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, p. 536–543, 2003.

DAO, T. H. Field decay of wheat straw and its effects on metribuzin and S-ethyl metribuzin sorption and elution from crop residues. **Journal of Environmental Quality**, v. 20, n. 1, p. 203-208, 1991.

EPP, J. B., SCHMITZER, P. R.; CROUSE, G. D. Fifty years of herbicide research: comparing the discovery of trifluralin and halauxifen-methyl. **Pest Management Science**, v. 74, n.1, p. 9-16, 2018.

EPP, J. B. et al. The discovery of Arylex™ active and Rinskor™ active: Two novel auxin herbicides. **Bioorg Med Chem**, v. 24, n. 3, p. 362-371, 2016.

EGAN, J. F; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A Meta-Analysis on the Effects of 2,4-D and Dicamba Drift on Soybean and Cotton. **Weed science**, v. 62, n. 1, p. 193-206, 2014.

FERREIRA, J. H. S. et al. Eficácia do amicarbazone e flumioxazim no controle de *Merremia aegyptia*, *Mucuna aterrima* e *Ricinus communis* no sistema de cana crua. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 19, n. 3. 2020.

FIGUEIREDO, M. R. A. **Interações entre os herbicidas 2,4-D e glifosato: aspectos químicos, bioquímicos e fisiológicos**. 2015. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

FORNAROLLI, D. A. et al. Influência da cobertura morta no comportamento do herbicida atrazine. **Planta Daninha**, v. 16, n. 2, p. 97-107, 1998.

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: Current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science**, v. 66, n. 2, p. 113–120, 2010.

GODOY, M. C. et al. Efeito da cobertura morta de milheto (*Pennisetum americanum*) sobre a eficácia do herbicida metribuzin no controle de *Ipomoea grandifolia* e *Sida rhombifolia*. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 79-86. 2007.

HEAP, I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. **WeedScience.org**, 2021. Disponível em: <<http://www.weedscience.org>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

HATZIOS, K. K; PENNER, D. **Metabolism of herbicides in higher plants**. 1 ed. Minneapolis: Burgess publishing Co, 1982. 142 p.

JONES, G. T. et al. Off-target movement of DGA and BAPMA dicamba to sensitive soybean. **Weed Technology**, v. 33, p. 51-65, 2019.

JOHNSON, V. A. et al. Cotton, Peanut, and Soybean Response to Sublethal Rates of Dicamba, Glufosinate, and 2,4-D. **Weed technology**, v. 26, n. 2, p. 195-206, 2012.

JUGULAM, M. et al. Evolution of resistance to auxinic herbicides: Historical perspectives, mechanisms of resistance, and implications for broadleaf weed management in agronomic crops. **Weed Science**, v. 59, p. 445-457, 2011.

KALSING, A. et al. Effect of Formulations and Spray Nozzles on 2,4-D Spray Drift under Field Conditions. **Weed Technology**, v. 32, p. 379–384, 2018.

LEWIS, K. A. et al. An international database for pesticide risk assessments and management. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 22, n. 4, p. 1050-1064, 2016.

LOCKE, M. A.; BRYSON, C. T. Herbicide-soil interaction in reduced tillage and plant residue management systems. **Weed Science**, v. 45, n. 1, p. 307-320, 1997.

LAMOREAUX, R. J.; JAIN, R.; HESS, F. D. **Efficacy of dimethenamid, metolachlor and encapsulated alachlor in soil covered with crop residue**. 3. ed. Gilroy: British crop protection council, 1993. p. 1015–1020.

MANUCHEHRI, M. R. et al. Non-2,4-D-resistant cotton response to glyphosate plus 2,4-D choline tank contamination. **Weed Technology**, v. 34, n. 1, p. 82-88, 2020.

MACIEL, C. D. G.; VELINI, E. D. Simulação do caminhamento da água da chuva e herbicidas em palhadas utilizadas em sistemas de plantio direto. **Planta Daninha**, v. 23, n. 3, p. 471- 481, 2005.

MITSCHERLICH, E. A. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtschaftliches Jahrbuch**, v. 38, p. 537-552, 1909.

MCDUGAL, P. Evolution of the Crop Protection Industry Since 1960. **Agribusiness intelligence**, Crop life, 2018. Disponível em: https://agribusinessintelligence.informa.com/~media/informashopwindow/agri/image/s/samplecontent/reports/pmd_evolution_of_the_crop_protection_industry.pdf. Acesso em 07 jan. 2021.

PETERSON, M. A. et al. 2,4-D Past, present, and future: A review. **Weed technology**, v. 30, p. 303-345, 2016.

PETERSON, M. A. et al. 2,4-D past, present, and future: A review. **Weed Technology**, v. 30, p. 303-345, 2014.

ROSSI, C. V. S. et al. Dinâmica do herbicida metribuzin aplicado sobre palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Planta daninha**, v. 31, n. 1, p. 223-230, 2013.

RADOSEVICH, S. R.; GHERSA, C.; HOLT, J. S. **Weed ecology**: implications for management. 2. ed. New York: Wiley, 1997. 589 p.

REICHARDT, T. **Dinâmica da matéria orgânica e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP, 1996. 505 p.

REDDY, K. N.; et al. Chlorimuron ethyl sorption and desorption kinetics in soils and herbicide-desiccated cover Crop residues. **Journal of agricultural food and chemistry**, v. 43, p. 2752-2757, 1995.

RODRIGUES, B. N. Influência da cobertura morta no comportamento dos herbicidas imazaquin e clomazone. **Planta Daninha**, v. 11, n. 1, p. 21-8, 1993.

SANTIAGO, A. D. et al. Efficacy and selectivity of herbicides applied in cassava pre-emergence. **Revista caatinga**, v. 31, n. 3, p. 640-650, 2018.

SANCHOTENE, D. M. et al. Desempenho de diferentes herbicidas pré-emergentes para controle de *Euphorbia heterophylla* na cultura da soja. **Perspectiva**, v. 41, n. 155, p. 07-15, 2017.

SOSNOSKIE, L. M. et al. Evaluating the volatility of three formulations of 2,4-D when applied in the field. **Weed technology**, v. 29, p. 177-184, 2015.

SAUER, M.; ROBERT, S.; KLEINE-VEHN, J. Auxin: simply complicated. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 7, p. 2565–2577, 2013.

SOSNOSKIE, L. M. et al. Comparing volatility of three forms of 2,4-D when applied in the field. In: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL MEETING OF THE WEED, 333., 2012, Lawrence. **Anais...** Lawrence, KS: WSSA Abstract 333, 2012.

STRACHAN, S. D.; et al. Vapor movement of synthetic auxin herbicides: Aminocyclopyrachlor, Aminocyclopyrachlor-Methyl ester, Dicamba and Aminopyralid. **Weed Science**, v. 58, n. 2, p. 103-108, 2010.

SELIM, H. M.; ZHOU, L.; ZHU, H. Herbicide retention in soil as affected by sugarcane mulch residue. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 1445–1454, 2003.

STERLING, T. M.; HALL, J. C. Mechanism of action of natural auxins and the auxinic herbicides. In: ROE, R. M. et al. (Coord.). **Herbicide activity: toxicology, biochemistry and molecular biology**, IOS Press, 1997. p. 111-141.

SWINSCOW, T. D. V. **Statistics at square one**. 9. ed. Campbell: University of Southampton, 1997. 140 p.

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Research**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.

TROPALDI, L. et al. Eficácia de herbicidas inibidores da síntese de carotenoides no controle de espécies de capim-colchão. **Revista de ciências agrárias**, v. 4, n. 2, p. 443-453, 2018.

TROPALDI, L. et al. Herbicidas inibidores do fotossistema II em pré-emergência no controle de espécies de capim-colchão. **Revista Brasileira de herbicidas**, v. 16, n. 1, p. 30-37, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TOFOLI, G. R. et al. Dinâmica do tebuthiuron em palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 27, n. 4, p. 815-821, 2009.

TAN, X. et al. Mechanism of auxin perception by the TIR1 ubiquitin ligase. **Nature**, v. 446, n. 1, p. 640–645, 2007.

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 2. ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 1998, 792 p.

VELINI, E. D. et al. Dinâmica de Velpar K (hexazinona+diuron) em palha de cana-de-açúcar. In: **XXIV Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2004**. São Pedro. Anais... São Pedro: SBPCPD, 2004, p.55.

WRIGHT T. R. et al. Robust crop resistance to broadleaf and grass herbicides provided by aryloxyalkanoate dioxygenase transgenes. **Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America**, v. 47, n. 23, p. 20240-20245, 2010.

WILSON, R. D.; GERONIMO, J.; ARMBRUSTER, J. A. 2,4-D dissipation in field soils after applications of 2,4-D dimethylamine salt and 2,4-D 2-ethylhexyl ester. **Environmental toxicology and chemistry**, v. 16, n. 6, p. 1239-1246, 1997.

WATTS, D. W.; HALL, J. K. Tillage and application effects on herbicide leaching and runoff. **Soil and Tillage Research**, v. 39, n. 3-4, p. 241–257, 1996.

WATKINS, D. A. M. Some implications of the photochemical decomposition of pesticides. **Chem. Ind**, v. 5, p. 185–190, 1974.

WIESE, A. F.; REA, H. E. Bindweed (*Convolvulus arvensis* L.) control and seedling emergence as affected by tillage, 24-D and competitive crops. **Agronomy journal**, v. 51, n. 11, p. 672-675, 1959.

ZHOU, X. et al. Metabolism and Residues of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid in DAS-40278-9 Maize (*Zea mays*) Transformed with Aryloxyalkanoate Dioxygenase-1 Gene. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 40, p. 7438–7444, 2016.

CAPÍTULO 3

DINÂMICA EM PALHA E CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS COM DICAMBA

RESUMO

Quatro experimentos foram conduzidos em casa de vegetação e laboratório. As hipóteses dos estudos é que o herbicida dicamba possui ação residual de controle em plantas daninhas e que a presença da palha de milho pode suprimir o desenvolvimento dessas plantas e também interferir na ação residual desse herbicida. Os objetivos foram avaliar o efeito da palha de milho na dinâmica de dicamba sal de DGA, sua ação residual de controle em *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica* e a influência da dinâmica em palha na sua eficácia de controle em pré-emergência. Para avaliação da lixiviação do herbicida na palha, lâminas de chuva acumuladas (5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm) foram simuladas em diferentes períodos após a aplicação de Dicamba sal de DGA (480 g e.a. ha⁻¹) e alíquotas das soluções coletadas foram quantificadas por HPLC MS/MS. Para avaliação da eficácia, foram realizadas curvas de dose-reposta com a aplicação do mesmo herbicida na pré-emergência das espécies descritas em solo com ausência e presença de palha. Avaliou-se número de plantas emergidas e biomassa aos 21 dias após a aplicação. A persistência de dicamba na palha é alta (entre 37 e 54%) e sua lixiviação aumenta em decorrência do maior volume de chuvas. Quanto maior o período entre a aplicação do herbicida e a ocorrência da primeira chuva, menor é a quantidade final recuperada de dicamba, independentemente do volume acumulado. Sem a presença de palha sobre o solo, dicamba é eficaz em todas as espécies avaliadas. A presença de palha potencializa a ação de dicamba e o efeito de controle nas plantas daninhas é aumentado. Em condições normais de pluviosidade, a palha de milho não tem potencial de prolongar a ação residual de controle do herbicida. Dicamba tem potencial para ser utilizado como herbicida pré-emergente no controle das plantas daninhas avaliadas.

Palavras-chave: cobertura vegetal; cromatografia; dinâmica; eficácia; eudicotiledôneas; herbicidas auxínicos; monocotiledôneas.

CHAPTER 3

DYNAMIC IN STRAW AND WEED CONTROL WITH DICAMBA

ABSTRACT

Four assays were conducted in a greenhouse and lab. The objectives were to evaluate the effect of corn straw on the dynamics of DGA salt dicamba, residual control efficacy on *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* and *Eleusine indica* and the effect of straw dynamic in the residual control efficacy. To evaluate the herbicide leaching in the straw, accumulated rain blades were simulated in different periods after the application of Atectra® and aliquots of the collected solutions were quantified by HPLC MS/MS. To evaluate the efficacy, dose-response curves were performed with the application of the same herbicide in the pre-emergence of the species described in soil with absence and presence of corn straw. Number of plants and dry biomass was evaluated at 21 days after application. The persistence of dicamba in straw is high and the leaching increases due to the greater rainfall. As longer the period between application of the herbicide and the occurrence of the first rain, as smaller the final concentration of dicamba recovered, regardless of the accumulated rainfall. Without the presence of straw on the soil, dicamba is effective in all species evaluated. The presence of straw increased the dicamba action and the control efficacy on weeds. Under usually rainfall conditions, corn straw has not potential to prolong the herbicide residual control period. Dicamba has the potential to be used as a pre-emergent herbicide to control the evaluated weeds.

Keywords: auxinic herbicides; chromatography; dicotyledonous; dynamic; efficacy; monocotyledonous; vegetative cover.

3.1 INTRODUÇÃO

Atualmente o mercado global de pesticidas é estimado em US\$ 50 bilhões anuais e aproximadamente 60% são representados por herbicidas (MCDOUGAL, 2018) com destaque para dicamba com uma área global tratada de aproximadamente 50 milhões de ha (BUSI et al., 2018).

Dicamba é uma auxina sintética que pertence a classe dos herbicidas mimetizadores do fitormônio ácido-indol-3-acético AIA (STERLING; HALL, 1997). O sucesso de seu uso na agricultura se deve principalmente a seletividade, eficácia, amplo espectro de ação, baixo custo e relativa baixa evolução nos casos de resistência quando comparados a vários outros herbicidas (BURNSIDE et al., 1996; JUGULAM et al., 2011). Desde a sua introdução em 1963 (BUSI et al., 2018), a resistência ao dicamba tem sido descrita em apenas 7 espécies de plantas daninhas, sendo o primeiro caso ocorrido em 1990 para *Sinapis arvensis* (HEAP, 2021).

A baixa evolução nos casos de resistência ao dicamba e a falta de novos mecanismos de ação disponíveis despertou o interesse da indústria e resultou no desenvolvimento de cultivares tolerantes, como é o caso do algodão e da soja lançados nos Estados Unidos em 2015 e 2016, respectivamente (ALVES et al., 2020). São alternativas importantes para o manejo de plantas daninhas, no entanto, seu uso apresenta alguns desafios como os frequentes relatos de fitointoxicação em culturas não alvo, devido a problemas com deriva, volatilização e contaminação de tanques de pulverizadores já que a maioria das culturas não tolerantes são extremamente sensíveis ao dicamba (JONES et al., 2019; BUOL et al., 2019; BALES; SPRAGUE, 2019). Neste contexto, diversos trabalhos tem sido conduzidos para compreender esses efeitos indesejados (STRACHAN et al., 2010; JOHNSON et al., 2012; MUELLER et al., 2013; EGAN et al., 2014; CUNDIFF et al., 2017; JONES et al., 2019; FERREIRA et al., 2020).

Entretanto, faltam estudos que explorem melhor o potencial agrônomo de dicamba em relação a seu efeito residual nos solos. Para isso, é necessário compreender também a sua dinâmica em coberturas vegetais mortas, uma vez que o sistema de semeadura direta é amplamente disseminado e está presente em mais de 116 milhões de hectares em todo o mundo (DERPSCH et al., 2010) e, portanto, grande parte do dicamba aplicado será depositado sobre esses resíduos afetando

sua disponibilidade para o solo. A presença de palha sobre o solo altera a dinâmica dos herbicidas aplicados sobre ela, sobretudo em períodos de menores precipitações, impactando na sua ação residual de controle em plantas daninhas e na seletividade às culturas presentes e, em alguns casos, podendo também causar carryover em culturas subsequentes (VELINI et al., 2005). Além disso, as diferentes formulações de dicamba também podem impactar na sua dinâmica em palha, especialmente devido as alterações na pressão de vapor e, consequentemente na volatilização. Pesquisadores tem mostrado significativas reduções na volatilização de dicamba na formulação diglicolamina (DGA) em comparação a formulação demetilamina (DMA) (MUELLER e STECKEL, 2019).

A hipótese é que o herbicida dicamba seja eficaz na pré-emergência de plantas daninhas monocotiledôneas e eudicotiledôneas, e que a presença da cobertura vegetal altere sua dinâmica, consequentemente impactando na eficiência de controle nas plantas daninhas.

Diante do exposto, os objetivos deste trabalho foram avaliar o efeito residual do herbicida dicamba sal de DGA em *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*, analisar sua dinâmica em palha de milho em função de lâminas e períodos variáveis de chuva, e compreender a relação entre sua disponibilidade no solo e eficácia nas plantas daninhas.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos entre os anos de 2019 e 2020 em casa de vegetação e laboratório no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia - NUPAM, pertencente a Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, *câmpus* de Botucatu, SP.

3.2.1 Dinâmica do herbicida dicamba sal de DGA em palha

Foram conduzidos 2 experimentos para determinação da dinâmica de dicamba em palha de milho. Os tratamentos consistiram na aplicação de Dicamba sal de DGA (Atectra® - 480 g e.a. L⁻¹) na concentração de 480 g e.a. ha⁻¹, seguido de simulações

de chuva com lâminas acumuladas de 5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm aos 0, 1, 3, 7 e 15 dias após a aplicação do herbicida (DAA).

As unidades experimentais corresponderam a recipientes de 4,5 cm de diâmetro (cápsulas de laminado de polipropileno) devidamente preenchidos com palha, acoplados à tubos coletores com capacidade para 50 mL ou 300 mL e posicionados verticalmente sobre uma estante metálica de apoio. A palha foi obtida em folhas de plantas de milho híbridos Pioneer® P3707 VYH, Forseed® FS 587 PWU e Dekalb® DKB 345 PRO3, em estágio de senescência, coletadas em lavouras sem histórico de aplicação de herbicidas, cortadas em pequenos fragmentos de aproximadamente 0,5 x 1 cm e pesadas em balança de precisão 0,0001 g em quantidade equivalente a 5 t ha⁻¹.

Para a pulverização do herbicida, foi utilizado um pulverizador estacionário constituído por estrutura metálica que suporta uma barra de pulverização de 2 m de largura, equipada com quatro pontas XR 11002 VS, espaçadas em 0,5 m entre si e dispostas a 0,5 m de altura em relação às unidades experimentais. A barra se desloca por uma área útil de 6,0 m² no sentido do seu comprimento, e é tracionada por um motor elétrico em conjunto com um modulador de frequência que controla a velocidade de trabalho. A pressão de trabalho utilizada pelo equipamento foi de 2,0 kgf cm⁻², com velocidade de 3,6 km h⁻¹ e consumo de calda de 200 L ha⁻¹. As condições climáticas no momento das aplicações foram temperaturas 25°C e 29°C e umidade relativa 60% e 53%, para os ensaios 1 e 2, respectivamente.

Imediatamente após a aplicação, os alvos que não continham palha foram lavados com 40 ml de água destilada para posterior quantificação do total de dicamba depositado. Para simulação das lâminas de chuva, no mesmo pulverizador descrito foi acoplada uma segunda barra de pulverização posicionada no sentido longitudinal as unidades experimentais. A barra foi constituída por dez pontas de pulverização Teejet® DG 9505 EVS, espaçadas em 6,5 cm entre si e dispostas a 0,5 m de altura em relação ao alvo. O sistema foi calibrado com pressão de trabalho de 2,0 kgf cm⁻², permitindo a produção de lâminas variáveis, de modo que, a cada movimento da barra de aplicação um acumulado de 2,5 mm de chuva foi gerado.

Após a aplicação dos tratamentos, as unidades experimentais foram mantidas em ambiente externo sob radiação solar e protegidas por uma estrutura com cobertura de quartzo por até 15 dias após a aplicação (DAA). O quartzo foi utilizado por permitir a passagem dos comprimentos de onda ultravioleta entre 290 e 400 nm,

que são as faixas responsáveis por promover fotodegradação de herbicidas (RADOSEVICH; GHERSA; HOLT, 1997).

Para avaliação da dinâmica na palha, em cada período após a aplicação do herbicida (0, 1, 3, 7 e 15 DAA) e para cada lâmina de chuva acumulada (5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm), as soluções resultantes da transposição na palha foram mensuradas e alíquotas filtradas em filtro Millex HV (Millipore) 0,45 µm, com membrana durapore 13 mm e acondicionados em vial âmbar 9 mm (Flow Supply) com 2 mL de capacidade para posterior análise cromatográfica.

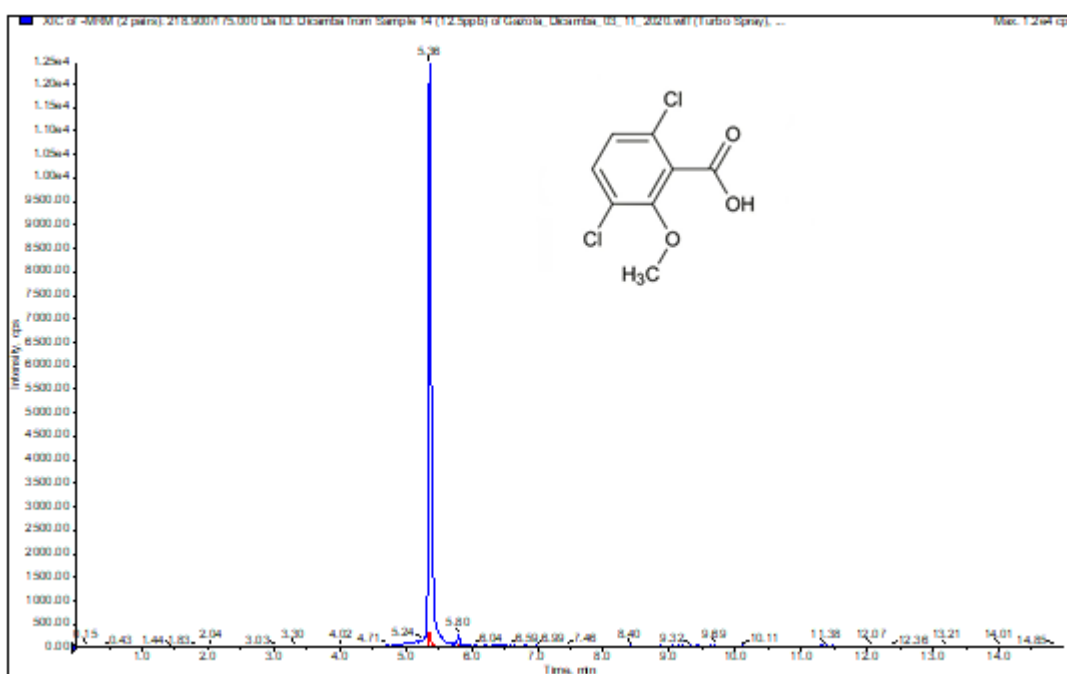
A determinação da concentração do herbicida na solução foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência e espectrometria de massas (HPLC-MS/MS), composto por um cromatógrafo líquido de alta eficiência (Prominence UFLC, Shimadzu Corporation), acoplado a um espectrômetro de massas (4500, Triple Quad, AB Sciex) híbrido triplo quadrupolo. As condições cromatográficas para a quantificação do composto foram otimizadas para cada modo de ionização (Tabela 1). Foi escolhido o modo de ionização da fonte (eletrospray - ESI), que permite a detecção e a separação dos compostos em uma única corrida para os modos positivo e negativo.

Tabela 1 – Condições cromatográficas utilizadas para quantificação de dicamba

Coluna analítica	Coluna analítica Kinetex 2,6 µM Phenyl-Hexyl 100 x 2.1MM
Volume de injeção	20 µL
Fase móvel (pH 7,0)	Fase A (FA) = 0,1% de ácido fórmico em água Fase B (FB) = 0,1% de ácido fórmico em metanol
Gradiente	0 – 2 minutos = 25% FB e 75% FA 2 – 4 minutos = 95% FB e 5% FA 4 – 8 minutos = 95% FB e 5% FA 8 – 10 minutos = 25% FB e 75% FA 10 – 15 minutos = 25% FB e 75% FA
Fluxo	0,300 ml min ⁻¹
Temperatura do forno	50°C

O tempo total de corrida foi de 15 minutos, com retenção na coluna cromatográfica de 5,36 minutos. O íon utilizado para quantificação foi o primeiro fragmento gerado a partir da molécula dicamba (massa molecular 218,900; Fragmentos 175,000; 144,600). A curva analítica para o composto foi construída em faixas de concentração, sendo: equação da reta ensaio 1 $\rightarrow y = 3,08e+005 x + 7,71e+004$; R^2 ensaio 1 = 0,9990; equação da reta ensaio 2 $\rightarrow y = 2.36e+003 x + 1.94e+003$; R^2 ensaio 2 = 0,9965; Intervalo linear 0,09765 – 50 ppb; curva analítica = 1,5625 – 200 ng ml⁻¹. Na figura 1 encontra-se o cromatograma obtido para dicamba.

Figura 1 – Cromatograma obtido para o herbicida dicamba (12,5 µg L⁻¹)



3.2.2 Controle de plantas daninhas em pré-emergência com uso de dicamba sal de DGA

Foram conduzidos dois experimentos de curvas de dose-resposta para determinação da eficácia do herbicida Dicamba sal de DGA (Atectra® - 480 g e.a. L⁻¹) na pré-emergência das espécies *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica* com ausência e presença de palha sobre o solo e simulações de chuva.

A quantidade de sementes de cada espécie foi padronizada por peso, sendo *D. insularis* 0,200 g; *Conyza* spp. 0,400 g; *B. pilosa* 0,350 g; *A. hybridus* 0,050 g; *E.*

heterophylla 0,400 g; *E. indica* 0,070 g. Após pesadas, as sementes de todas as espécies foram misturadas e acondicionadas em sacos de papel para posterior semeadura em bandejas plásticas medindo 27 x 41 cm com capacidade para 7,5 L.

O solo utilizado apresentou as seguintes características físico-químicas: 281, 87 e 632 g.dm⁻³ de argila, silte e areia, respectivamente; pH (CaCl₂) = 5,3; M.O. = 11 g dm⁻³; P (resina) = 18 mg dm⁻³; Al³⁺ = 2 mmolc dm⁻³; H+Al = 40 mmolc dm⁻³; K⁺ = 0,8 mmolc dm⁻³; Ca²⁺ = 21 mmolc dm⁻³; Mg²⁺ = 9 mmolc dm⁻³; SB = 31 mmolc dm⁻³; CTC (T) = 70 mmolc dm⁻³; S = 56 mg dm⁻³ e V% = 42.

Para a semeadura, as bandejas foram preenchidas com 3,5 L de solo seco e peneirado, acomodou-se em seu centro uma moldura metálica medindo 24 x 38 cm onde as sementes de todas as espécies foram distribuídas uniformemente em seu interior. Em seguida, realizou-se a cobertura com mais 1,5 L de solo e retirou-se cuidadosamente a moldura para que as sementes ficassem em sua área útil e dispostas a aproximadamente 1 cm de profundidade. O procedimento foi necessário para garantir que o efeito físico da palha nas espécies não fosse prejudicado.

A palha utilizada foi coletada em lavouras de milho híbridos Pioneer® P3707 VYH, Forseed® FS 587 PWU e Dekalb® DKB 345 PRO3, sem histórico de aplicação de herbicidas. Para isso, foram coletadas apenas as folhas presente nas plantas em estágio de senescência, cortadas em pequenos fragmentos de aproximadamente 5 x 3 cm, homogeneizadas formando uma mistura dos híbridos, e pesadas em balança de precisão na quantidade relativa a 5 t ha⁻¹.

Os tratamentos consistiram em aplicações do herbicida dicamba nas concentrações 0; 30; 60; 120; 240; 480; 960 e 1920 g e.a. ha⁻¹ seguidos por simulação de lâmina de chuva de 10 mm de acordo com cada modalidade, sendo: SP – Aplicação do herbicida diretamente sobre o solo semeado, seguido por simulação de chuva; ACP – Aplicação do herbicida diretamente sobre o solo semeado, seguido por cobertura física com a palha e simulação de chuva; ASP – Aplicação do herbicida diretamente sobre a palha recobrindo o solo semeado, seguido por simulação de chuva. Posteriormente, durante a condução dos experimentos, o tratamento SP foi irrigado cuidadosamente com 10 mm de água conforme necessidade das plantas. Os tratamentos ACP e ASP receberam nova simulação de 10 mm de chuva aos 11 DAA quando houve necessidade das plantas (Figura 2).

A pulverização dos tratamentos e simulação da lâmina de chuva ocorreu no mesmo simulador de pulverização e com as mesmas configurações descritas no experimento anterior. As condições climáticas no momento das aplicações foram temperaturas 24°C e 27°C e umidade relativa 71% e 66%, para os ensaios 1 e 2, respectivamente.

As parcelas foram submetidas a avaliação de porcentagem de controle aos 21 DAA mediante a contagem do número de plântulas emergidas (NP). No primeiro experimento, foi realizada também a quantificação da massa seca da parte aérea (MSPA) para determinar a dinâmica de emergência e crescimento das plantas. A MSPA foi obtida mediante ao corte da parte aérea das plantas de cada espécie e secagem em estufa de circulação forçada de ar a 60°C, até massa constante, para posterior pesagem em balança de precisão 0,0001g.

Figura 2 – Simulação de chuva após aplicação do herbicida nas parcelas (A), tratamentos sem a presença de palha (B) e tratamentos com a presença de palha de milho (C)



3.2.3 Análise estatística

Todos os experimentos foram conduzidos em delineamento inteiramente casualizado. No ensaio de dinâmica do herbicida dicamba em palha, adotou-se o esquema fatorial do tipo 6 lâminas de chuva x 5 períodos de transposição na palha com 5 repetições, totalizando 30 tratamentos. Para os ensaios de controle das plantas daninhas em pré-emergência, os experimentos foram compostos por 8 tratamentos (doses de dicamba) e 4 repetições. Satisfazendo há homogeneidade dos dados, mediante a avaliação da grandeza dos quadrados médios residuais, as

réplicas experimentais de cada ensaio foram agrupadas e analisadas de forma conjunta.

Os resultados da transposição de dicamba em palha foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Sendo significativo, os dados das concentrações do herbicida presente nas soluções foram convertidas em porcentagem em relação ao total aplicado e ajustados ao modelo de regressão não-linear desenvolvido por Mitscherlich (1909):

$$Y=a[1-10(-c(X+b))]$$

Em que: a , b e c correspondem aos parâmetros da equação, sendo o parâmetro a representado pela assíntota máxima da curva na qual indica o máximo de herbicida recuperado para o total de chuva acumulada, o parâmetro b corresponde ao deslocamento lateral da curva e o parâmetro c indica a concavidade da curva. O valor de Y representa o total do herbicida extraído da palha e X sugere a lâmina de chuva (mm) necessária para a movimentação do herbicida na palha.

Para explicar o comportamento das espécies quanto a emergência e crescimento, realizou-se a análise de correlação linear de Pearson proposta por Swinscow (1997):

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}}$$

onde: x representa os valores do número de plantas de cada espécie, y indica o teor de biomassa seca de cada espécie, $\bar{x}$ e $\bar{y}$ são as médias amostrais de cada variável, Σ simboliza o somatório e r o coeficiente de determinação.

Os resultados de NP foram submetidos a análise de variância pelo teste de F. Sendo significativo, foram convertidos em porcentagem em relação as testemunhas não aplicadas e ajustados ao modelo de regressão não-linear proposto por Streibig (1988):

$$y = \frac{a}{\left[1 + \left(\frac{x}{X_0}\right)^b\right]}$$

onde: y é o percentual de controle; x é a concentração do herbicida em g e.a. ha^{-1} ; a é a amplitude existente entre o ponto máximo e o ponto mínimo da variável; X_0 é a concentração do herbicida que proporciona 50% de resposta da variável; b é a declividade da curva ao redor de X_0 .

A partir das equações foram construídas as curvas de dose-resposta. Com base nos modelos ajustados, realizou-se o cálculo da concentração do herbicida que proporcionaria 80% e 90% de controle (CL_{80} e CL_{90}). Para realização do cálculo utilizou-se a seguinte equação:

$$CL_F = \left(\frac{F}{100 - F}\right)^{1/b} \cdot X_0$$

onde: F indica a CL (CL_{80} ou CL_{90}) a ser calculada, b e X_0 são os parâmetros da equação de Streibig (1988).

As análises de regressão foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS Institute, version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Dinâmica de Dicamba sal de DGA em palha de milho

Houve diferença significativa para o teor de dicamba lixiviado da palha de milho na quantidade de 5 t ha^{-1} , em função dos dias após sua aplicação e simulação de diferentes lâminas de chuva. O modelo ajustado de Mitscherlich (1909) foi adequado e apresentou alto coeficiente de determinação em todos os períodos de avaliação (Tabela 2). O parâmetro a do modelo é o máximo de dicamba recuperado para o total de chuva acumulada em cada situação avaliada. Portanto, diferenças finais

mínimas foram observadas em relação à liberação do herbicida em cada período avaliado após 100 mm de chuva (Tabela 2).

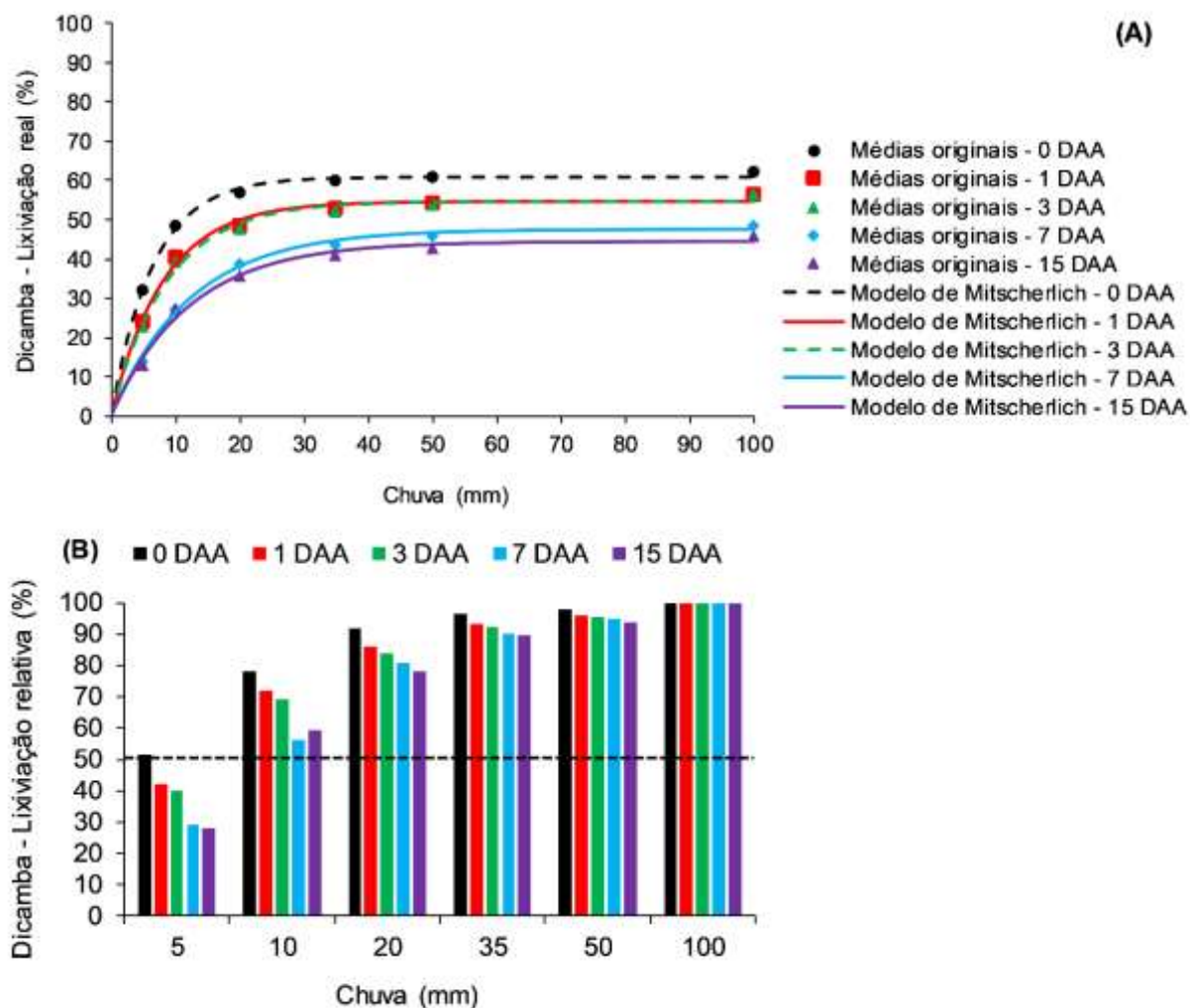
Tabela 2 – Estimativas dos parâmetros do modelo de Mitscherlich ajustados para o teor de dicamba sal de DGA lixiviado da palha de milho (5 t ha⁻¹) em função dos dias após sua aplicação e simulação de diferentes lâminas de chuva (mm)

Dias sem chuva	Parâmetros do modelo				Valor de F
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R ²	
0	61,0288	0	0,0662	0,9987	11330,2000**
1	54,8658	0	0,0531	0,9991	2809,9900**
3	54,7578	0	0,0495	0,9989	2313,0500**
7	47,5389	0	0,0351	0,9992	3242,8700**
15	44,6515	0	0,0356	0,9984	1573,5600**

**Significativo pelo teste de F a 1% de probabilidade.

Na aplicação de dicamba em palha de milho seguida por simulação de lâminas variáveis de chuva no mesmo dia (0 DAA) houve maior transposição do herbicida, com valores de 32, 48, 57, 60, 61 e 62%, para as lâminas de chuva de 5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm, respectivamente (Figura 3 A). Com 15 dias sem chuva (15 DAA) houve a menor transposição de dicamba na palha, lixiviando 13, 27, 35, 41, 43 e 45%, nas lâminas de 5, 10, 20, 35, 50 e 100 mm de chuva, respectivamente (Figura 3 A).

Figura 3 – Porcentagem de dicamba sal de DGA lixiviado na palha de milho em relação ao total aplicado (A) e relativo à lâmina de 100 mm (B) em função dos dias após sua aplicação (DAA) e simulação de diferentes lâminas de chuva



Com o volume de chuva de 5 mm ocorrendo aos 0, 1, 3, 7, e 15 DAA, a quantidade de dicamba lixiviada na palha de milho foi de 32, 24, 22, 14 e 13%, respectivamente (Figura 3 A). Já com 100 mm de chuva nestes mesmos períodos, 62, 56, 56, 48 e 45% do herbicida, respectivamente, lixiviou na palha (Figura 3 A). Portanto, mesmo com a aplicação de dicamba ocorrendo em períodos de chuvas intensas, a retenção na palha foi alta. Além disso, quanto mais tempo demorou para ocorrer as primeiras lâminas de chuva, maior foi a quantidade de água necessária para a transposição acontecer e menor foi a quantidade final de dicamba recuperado (Figura 3 A). De maneira geral, os primeiros 10 mm foram os mais importantes em termos de transposição de dicamba na palha, pois proporcionalmente disponibilizaram maior concentração do herbicida independentemente do período em que a chuva ocorreu (Figura 3 B).

Diversos autores também relataram a importância da intensidade e época de ocorrência das primeiras chuvas após aplicação de vários outros herbicidas no processo de lixiviação em palha (RODRIGUES, 1993; FORNAROLLI et al., 1998; MACIEL; VELINI, 2005; CAVENAGHI et al., 2007; CARBONARI et al., 2009; TOFOLI et al., 2009; CARBONARI et al., 2010; ROSSI et al., 2013; CARBONARI et al., 2016). Contudo, não há estudos disponíveis na literatura que avaliam o efeito da palha de milho na retenção e lixiviação de dicamba para o solo. Portanto, os resultados dessa pesquisa preenchem essa lacuna e são necessários já que o uso de dicamba será intensificado nos próximos anos devido a liberação comercial das cultivares de algodão e soja tolerantes (BEHRENS et al., 2007).

A recomendação para uso de dicamba é na pós-emergência das plantas, porém esse herbicida também possui ação residual nos solos. Quando a aplicação dos herbicidas ocorre na pré-emergência, suas características físico-químicas, a presença e as características da cobertura vegetal (origem, nível de envelhecimento, quantidade e distribuição) e o regime de chuvas que ocorrem após sua aplicação, atuarão na interceptação e afetarão diretamente sua disponibilidade para o solo (SELIM et al., 2003; LAMOREAUX et al., 1993; RODRIGUES, 1993; WATTS; HALL, 1996). Outro fator importante que explica a diminuição da lixiviação de herbicidas em palha é a degradação do produto que pode ocorrer principalmente por fotólise e/ou volatilização (LOCKE; BRYSON, 1997).

Para que a fotodegradação de uma molécula herbicida ocorra, sua absorvância máxima precisa ocorrer em comprimentos de onda na faixa de 290 a 400 nanômetros (nm), isso porque os comprimentos abaixo de 290 nm são absorvidos pela camada de ozônio e praticamente não chegam a superfície terrestre e maiores que 400 nm não possuem energia suficiente para promover a quebra das moléculas (WATKINS, 1974; REICHARDT, 1996; RADOSEVICH; GHERSA; HOLT, 1997). O dicamba não é uma molécula que sofre fotodegradação nas nossas condições ambientais, os relatos de literatura indicam que sua absorvância máxima de luz ocorre nos comprimentos de onda de 208,5, 228, 280 e 280,5 nm (LEWIS et al., 2016; DADAZIO, 2018).

Para ocorrer volatilização, a pressão de vapor e solubilidade do herbicida, bem como as condições de temperatura e umidade, presença de plantas, cobertura vegetal morta e solo tratado devem influenciar nesse processo. Dicamba é um ácido fraco com pK_a de 1,87 (LEWIS et al., 2016) e sua dissociação pode ter impacto

substancial na volatilidade, uma vez que sua forma ácida é a principal fonte de volatilização (BEHRENS; LUESCHEN, 1979; BISH et al., 2019; MUELLER et al., 2019). Pesquisas anteriores mostraram que a volatilização de dicamba na formulação sal de diglicolamina – DGA (mesma utilizada nesses experimentos) é 50% menor em comparação ao sal de dimetilamina – DMA (EGAN; MORTENSEN, 2012; MUELLER et al., 2013; MUELLER et al., 2019) e a nova formulação de DGA que contém ácido acético reduz ainda mais essa volatilização, justamente por inibir a dissociação e formação do ácido dicamba (HEMMINGHAUS et al., 2017; ABRAHAM, 2018).

A superfície de deposição também influencia na taxa de volatilização de dicamba. A aplicação na formulação DMA em pós emergência de soja e milho aumenta em 35% a volatilização quando comparada a aplicação diretamente no solo (BEHRENS; LUESCHEN, 1979), e quando se aplica dicamba DGA diretamente na palha de milho a volatilização (aproximadamente $3,5 \text{ ng cm}^{-2}$) é ainda menor em comparação ao solo molhado ($9, 11 \text{ ng cm}^{-2}$) (CARBONARI et al., 2020a). Isso porque dicamba tem elevada solubilidade e baixa afinidade com os coloides do solo estando mais propenso a ser volatilizado (KERLE et al., 2007). A formulação DGA sem ácido acético (a mesma utilizada nesses experimentos) apresentou baixos níveis de volatilização em palha de milho e em solo seco (CARBONARI et al., 2020a).

Diante disso, é pouco provável que os eventuais níveis de volatilização de dicamba sal de DGA, que possam ter ocorrido na palha de milho, justifiquem a elevada redução na taxa de lixiviação observada neste experimento, embora possa ter contribuído com o processo (Figura 3). Essa informação é importante pois o sistema de plantio direto no Brasil ocupa 33 milhões de hectares e continua se expandindo (IBGE, 2017). Neste sistema é comum a adoção de milho no outono/inverno seguido por soja ou algodão no verão. Portanto, uma parte significativa de dicamba aplicado nesse sistema será depositado sobre a palha de milho e essa interação entre o herbicida e a palha é importante em termos de volatilização do produto, uma vez que ela é diferente do solo ou da superfície da folha das culturas (BEHRENS; LUESCHEN, 1979; CARBONARI et al., 2020b).

Diante dos fatos, a explicação mais plausível é que a quantidade de dicamba que não lixiviou pela palha de milho possa ter sido retida nesse material. Sabe-se que quanto maior a solubilidade em água, maior é a capacidade de um herbicida

transpor a cobertura vegetal e atingir o solo (CORREIA; REZENDE, 2002). O herbicida dicamba possui elevada solubilidade água ($400.000 \text{ mg L}^{-1}$) (KERLE et al. 2007) e, ainda assim, com 100 mm de chuva aos 15 DAA, apenas 45% do herbicida lixiviou na palha (Figura 3 A). Uma possível explicação é que no processo de envelhecimento da cobertura morta ocorre a degradação de lignina e celulose da parede celular; esse processo expõe as cargas presentes na palha e consequentemente aumenta-se a retenção do herbicida devido à maior superfície de contato (DAO, 1991; REDDY et al., 1995).

A maior persistência de dicamba em palha de milho pode interferir na eficácia de controle das plantas daninhas ao disponibilizar concentrações que podem não ser suficientes para controlar as espécies. Essa situação é ainda mais preocupante quando as chuvas demorarem para acontecer após sua aplicação pois a quantidade lixiviada diminui consideravelmente (Figura 3 A). Além disso, a partir de 35 mm de chuva ocorre a estabilização da lixiviação de dicamba em palha e apenas entre 2 a 5% a mais do herbicida é disponibilizado com 50 e 100 mm (Figura 3 A).

Carbonari et al. (2016) avaliando sulfentrazone aplicado na dose de $750 \text{ g i.a. ha}^{-1}$ sob 10 t ha^{-1} de palha de cana e simulação de um acumulado de 100 mm de chuva aos 1, 30 e 60 dias após sua aplicação, seguido de nova simulação de 20 mm de chuva aos 7 e 14 dias após a ocorrência dos primeiros 100 mm, verificaram que a quantidade máxima do herbicida que novamente foi liberada da palha foi de apenas 0,05%. Neste sentido, 100 mm de chuva acumulado parece promover a máxima liberação possível de herbicidas aplicados sobre a palha, sendo pouco provável que ocorra nova liberação em função de posteriores precipitações. No caso de dicamba, 35 mm parece ser o volume de chuva em que ocorre o ponto máximo de disponibilização do produto aplicado em palha (Figura 3 A).

Portanto, para dicamba a dinâmica em palha em função do regime de chuvas deve ser levada em consideração no posicionamento deste herbicida, visando sua ação residual em plantas daninhas, pois esse fator afeta diretamente sua concentração disponibilizada para os solos.

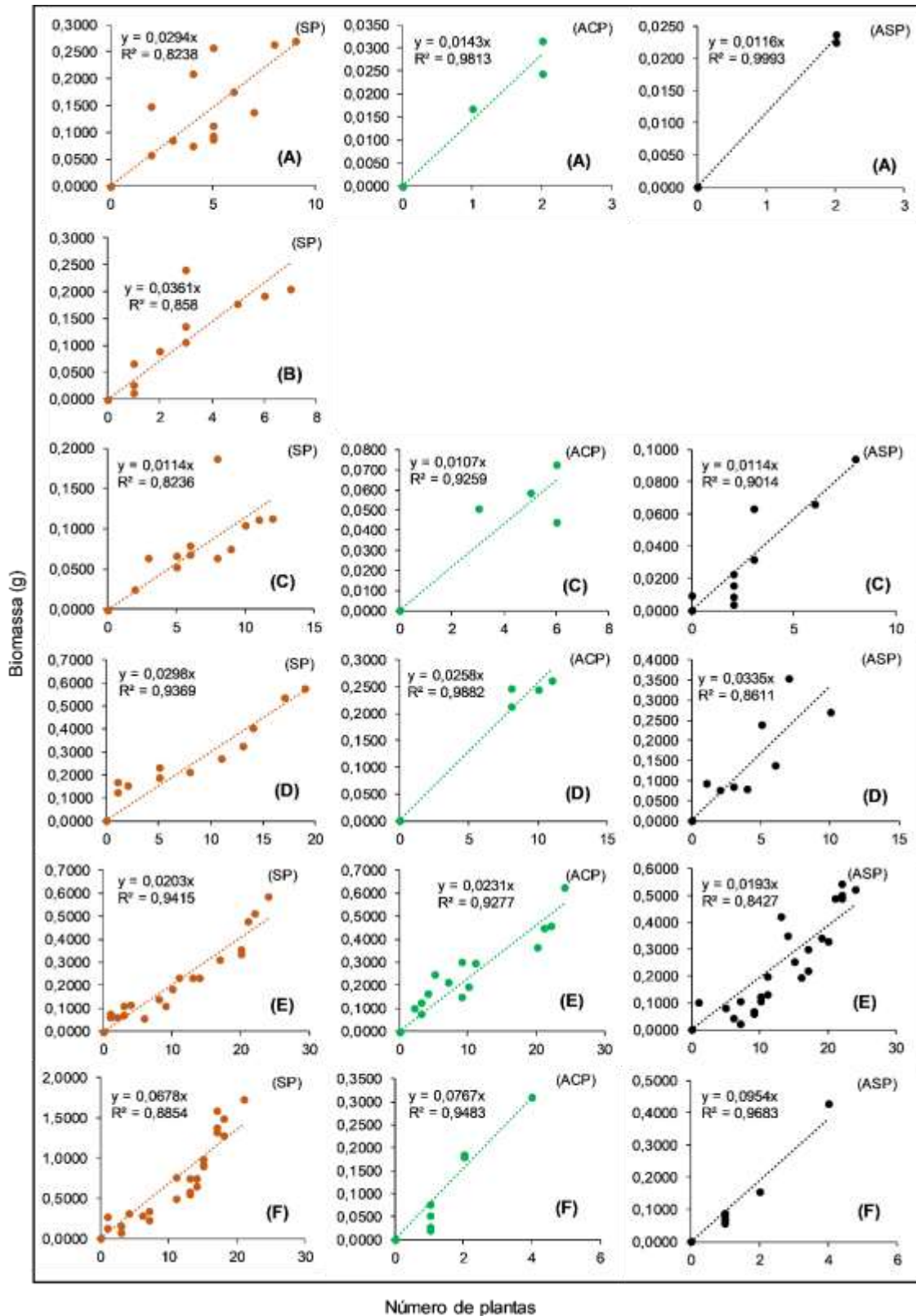
3.3.2 Efeito residual de dicamba sal de DGA em plantas daninhas

Para avaliar a eficiência de dicamba na pré-emergência das plantas daninhas, análises de correlação foram utilizadas para determinar qual variável seria mais

adequada para diagnosticar o efeito de controle. Em ensaios de eficácia diversos autores utilizam a biomassa vegetal ou realizam análise visuais de sintomas para aferir o efeito dos herbicidas no controle de plantas daninhas (TROPALDI et al., 2017; SANCHOTENE et al., 2017; TROPALDI et al., 2018; SANTIAGO et al., 2018; FERREIRA et al., 2020). Entretanto, a simples contagem do número de plantas presentes, desde que em situações controladas, pode ser um parâmetro importante e confiável para definir níveis de controle para alguns herbicidas aplicados na pré-emergência.

A alta correlação observada entre o número de plantas emergidas e a biomassa evidenciou que independentemente da presença ou ausência de palha recobrando o solo, o aumento do número de plantas se refletiu em maior acúmulo de biomassa (Figura 4). Isso demonstra que na pré-emergência, a ação de dicamba ocorre preferencialmente nas sementes em processo de germinação impedindo a emergência das plântulas. As que conseguiram emergir não apresentaram sintomas do herbicida e se desenvolveram normalmente, explicando a elevada correlação observada (Figura 4). Portanto, as duas variáveis analisadas foram confiáveis para avaliar nível de eficácia nas plantas daninhas, justificando o uso do número de plantas para tal finalidade neste experimento.

Figura 4 – Correlação entre a biomassa e o número de plantas de *Digitaria insularis* (A), *Conyza* spp. (B), *Bidens pilosa* (C), *Amaranthus hybridus* (D), *Euphorbia heterophylla* (E) e *Eleusine indica* (F) aos 21 dias após a aplicação de diferentes doses de dicamba sal de DGA



SP = aplicação sobre o solo sem palha; ACP = aplicação sobre o solo seguida por cobertura com palha; ASP = aplicação sobre a palha recobrindo o solo

Nota-se que houve diferença significativa de controle para cada espécie testada e o modelo log-logístico de Streibig (1988) foi considerado adequado para a interpretação dos resultados, já que apresentou elevados coeficientes de determinação para todas as espécies e modalidades de aplicação do herbicida (Tabela 3).

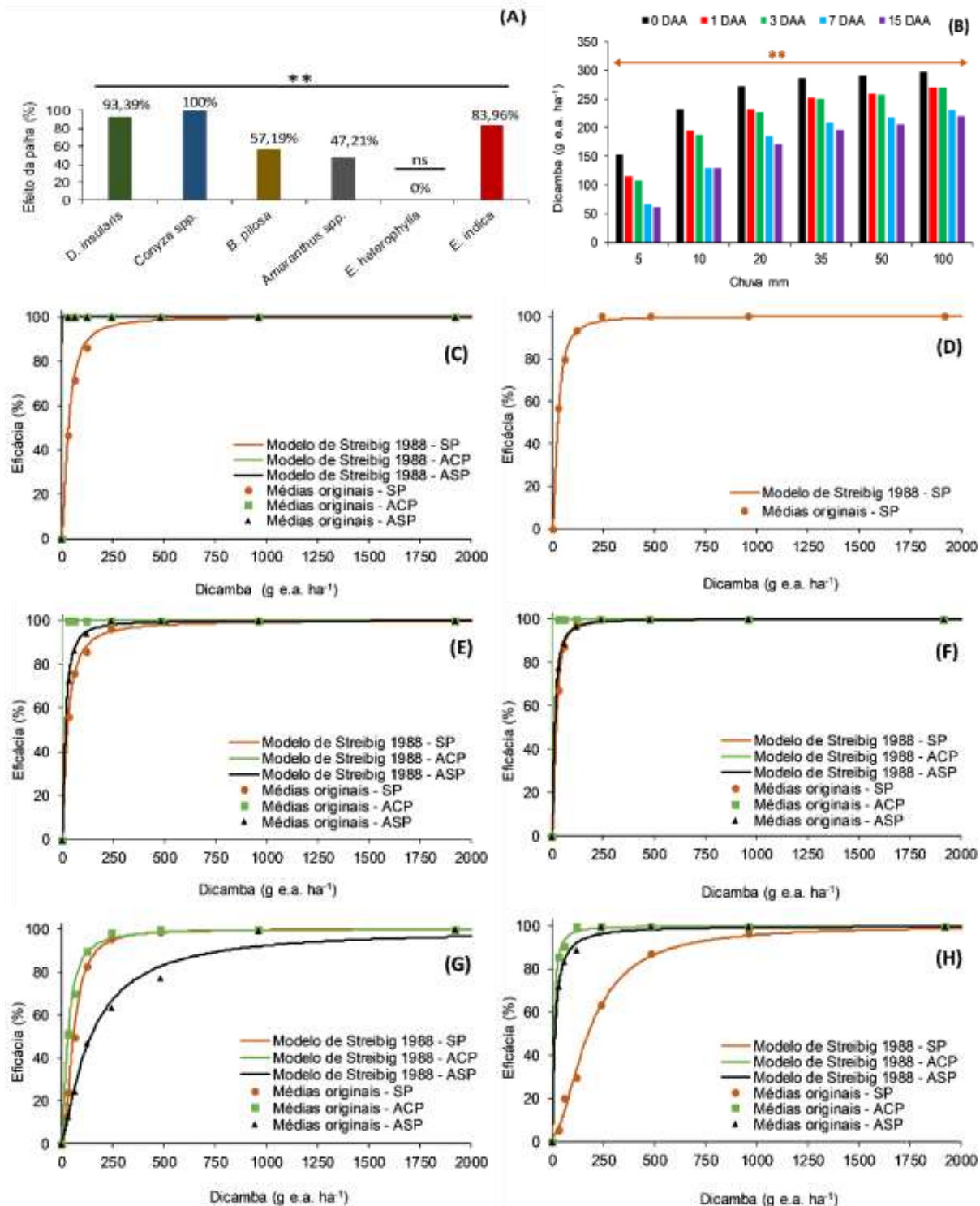
Tabela 3 - Valores estimados de CL₅₀, CL₈₀, CL₉₀ e coeficiente de determinação utilizando a análise de regressão não linear do tipo log-logístico proposto por Streibig, 1988^a

Espécies/ Modalidade de aplicação^c	CL₅₀^b	CL₈₀^b	CL₉₀^b	R²
<i>Digitaria insularis</i> SP	32,9172	79,0445	131,953	0,9972
<i>Digitaria insularis</i> ACP	0,0189	0,0394	0,0606	1
<i>Digitaria insularis</i> ASP	0,0404	0,0839	0,1287	1
<i>Conyza</i> spp. SP	25,8267	58,5121	94,4084	0,9992
<i>Bidens pilosa</i> SP	24,9490	72,5981	135,6040	0,9984
<i>Bidens pilosa</i> ACP	0,0173	0,0350	0,0530	0,9041
<i>Bidens pilosa</i> ASP	15,0433	40,2636	71,6183	0,9993
<i>Amaranthus hybridus</i> SP	20,2642	43,1330	67,1003	0,9108
<i>Amaranthus hybridus</i> ACP	0,0187	0,0378	0,0512	0,9528
<i>Amaranthus hybridus</i> ASP	12,8027	33,4759	58,7372	0,9994
<i>Euphorbia heterophylla</i> SP	57,7511	115,2070	172,5530	0,9401
<i>Euphorbia heterophylla</i> ACP	30,4375	76,7308	131,7860	0,9971
<i>Euphorbia heterophylla</i> ASP	143,7410	422,5980	794,133	0,8483
<i>Eleusine indica</i> SP	180,5430	389,4280	610,5410	0,8749
<i>Eleusine indica</i> ACP	8,2821	23,2364	42,4862	0,9978
<i>Eleusine indica</i> ASP	13,2203	45,9950	95,3784	0,9962

^aModelo: $y = a/(1+(x/x_0)^b)$. ^bCL₅₀, ^bCL₈₀, ^bCL₉₀ (dose de dicamba sal de DGA em g e.a. ha⁻¹ necessária para promover 50%, 80% e 90% de controle, respectivamente). ^cSP = aplicação do herbicida diretamente sobre o solo sem posterior cobertura com palha; ACP = aplicação de dicamba sobre o solo seguida por cobertura com palha; ASP = aplicação de dicamba sobre a palha recobrindo o solo; Todos seguidos por simulação de 10 mm de chuva.

A espécie *Digitaria insularis* foi bastante sensível a ação de dicamba em sua pré-emergência. Sem a presença de palha e com posterior simulação de 10 mm de chuva (SP), 79 g e.a. ha⁻¹ foi suficiente para promover 80% de controle (Tabela 3) e com a dose comercial (480 g e.a. ha⁻¹) o nível de eficácia chegou a 100 % (Figura 4 C). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 93% de controle (Figura 5 A). Quando dicamba foi aplicado no solo com posterior cobertura com a palha seguido por simulação de 10 mm de chuva (ACP), ou quando a aplicação ocorreu diretamente sobre a palha de milho seguido por simulação de 10 mm de chuva (ASP), 30 g e.a. ha⁻¹ do herbicida foi suficiente para promover 100% de controle (Figura 5 C).

Figura 5 – Efeito de 5 t ha⁻¹ de palha de milho (A), dinâmica (B) e eficácia de dicamba sal de DGA na pré-emergência de *Digitaria insularis* (C), *Conyza* spp. (D), *Bidens pilosa* (E), *Amaranthus hybridus* (F), *Euphorbia heterophylla* (G) e *Eleusine indica* (H)



SP = aplicação de dicamba sobre o solo sem posterior cobertura com palha; ACP = aplicação de dicamba sobre o solo seguida por cobertura com palha; ASP = aplicação de dicamba sobre a palha recobrindo o solo. DAA = dias após a aplicação. ns, ** Não significativo e significativo, respectivamente, a 1% de probabilidade pelo teste de F.

Conyza spp. também foi bastante sensível a aplicação de dicamba em pré-emergência. Na aplicação SP, 58,51 e 94,40 g e.a. ha⁻¹ foram suficientes para promover 80 e 90% de controle, respectivamente (Tabela 3) e com a dose comercial (480 g e.a. ha⁻¹) o nível de eficácia chegou a 100% (Figura 5 D). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 100% de controle (Figura 5 A).

A espécie *Bidens pilosa*, também foi bastante sensível a aplicação de dicamba em sua pré-emergência. Na aplicação SP, 72,59 e 135,60 g e.a. ha⁻¹ foram suficientes para promover 80 e 90% de controle, respectivamente (Tabela 3) e com a dose comercial (480 g e.a. ha⁻¹) o nível de eficácia chegou a 100% (Figura 5 E). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 57,19% de controle (Figura 5 A). Quando dicamba foi aplicado em ACP, apenas 0,03 e 0,05 g e.a. ha⁻¹ foram suficientes para promover 80 e 90% de controle, respectivamente (Figura 5 E). Já quando a aplicação de dicamba ocorreu em ASP, 40,26 e 71,61 g e.a. ha⁻¹ foram necessários para obter os mesmos efeitos de controle (Tabela 3 e Figura 5 E).

Para *Amaranthus hybridus*, na aplicação SP, foi necessário apenas 60 g e.a. ha⁻¹ para promover 87% de controle (Figura 5 F). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 47,21% de controle (Figura 5 A). Quando dicamba foi aplicado em ACP, 30 g e.a. ha⁻¹ foi suficiente para promover 100% de controle (Figura 5 F). Já quando a aplicação de dicamba ocorreu em ASP, foi necessário 240 g e.a. ha⁻¹ para obter os mesmos 100% de controle (Figura 5 F).

A espécie *Euphorbia heterophylla* também foi controlada eficientemente com o herbicida dicamba (Figura 5 G). Na aplicação SP, foi necessário 115,20 g e.a. ha⁻¹ para obter 80% de controle (Tabela 3 e Figura 5 G). A presença de 5 t ha⁻¹ de palha de milho sem aplicação do herbicida não promoveu efeito de controle (Figura 5 A). Quando dicamba foi aplicado em ACP, foi necessário 76,73 g e.a. ha⁻¹ para promover 80% de controle (Tabela 3, Figura 5 G). Já na aplicação ASP, a dose comercial (480 g e.a. ha⁻¹) foi suficiente para promover controle mínimo de 80% (Figura 5 G).

A monocotiledônea *Eleusine indica* também foi sensível a aplicação de dicamba em sua pré-emergência. Na aplicação SP, foi necessário 389,42 g e.a. ha⁻¹ para promover 80% de controle (Tabela 3 e Figura 5 H). A presença de 5 t ha⁻¹ de

palha de milho sem aplicação do herbicida foi suficiente para promover 83,96% de controle (Figura 5 A). Quando dicamba foi aplicado em ACP, 30 g e.a. ha⁻¹ foi suficiente para promover 85% de controle (Tabela 3, Figura 5 H). Já quando a aplicação de dicamba ocorreu em ASP, foi necessário 60 g e.a. ha⁻¹ para promover o mesmo efeito de controle (Figura 5 H).

De um modo geral, nota-se que em todas as espécies avaliadas, a aplicação ASP exigiu maiores concentrações de dicamba em comparação a aplicação ACP para obter os mesmos efeitos de controle (Figura 5 C, D, E, F, G, H). Isso ocorreu porque em ASP o dicamba precisou lixiviar pela palha de milho para chegar à solução do solo. Ao analisar sua dinâmica em palha com simulação de 10 mm de chuva logo após sua aplicação em dose comercial (mesmo volume de chuva utilizado neste experimento de eficácia), apenas 281,34 g e.a. ha⁻¹ (48,65%) conseguiu transpor a cobertura vegetal (Figura 5 B). Entretanto, essa menor lixiviação não implica em ajustes de dose do produto já que em todos os casos onde a cobertura vegetal esteve presente, com exceção de *E. heterophylla* em ASP, a dose comercial recomendada foi suficiente para exercer 100% controle nas espécies avaliadas (Figura 5). Para *E. heterophylla* com essa dose o controle foi de 80% (Tabela 3).

Especificamente para *E. heterophylla*, esperava-se também que o resultado de ACP e SP fossem semelhantes já que não houve efeito físico da palha na sua supressão e o herbicida não precisou transpor a palha. Todavia, nota-se que em ACP foi necessário 33,39% menos dicamba para obter os mesmos 80% de controle observado em SP (Tabela 3). Isso significa que a palha de milho potencializou a ação do herbicida, provavelmente devido a liberação de compostos químicos como açúcares, proteínas, aminoácidos e ácidos orgânicos presentes que permitiram a maior absorção do produto e, conseqüentemente, maior efeito de controle nas plantas daninhas. Provavelmente esse efeito também ocorreu para as demais espécies avaliadas, contudo não foi possível determiná-lo isoladamente já que a palha exerceu supressão de controle nas plantas (Figura 5 A).

Experimentos que avaliam o efeito residual de dicamba em plantas daninhas são raros. Johnson et al. (2010) relataram eficácia de dicamba (273 g e.a ha⁻¹) na pré-emergência de *Conyza* spp. e *Chenopodium album* em diversas regiões dos EUA entre os anos de 2007 e 2009. Recentemente Ou et al. (2018) observaram que dicamba (560 g e.a. ha⁻¹) controlou eficientemente *Kochia scoparia* na pré-

emergência, desde que a infestação dos biótipos resistentes não ultrapassasse 600 sementes viáveis m².

Um ponto importante a ser considerado é a necessidade da ocorrência de chuvas após a aplicação de dicamba em pré-emergência para que o herbicida chegue à solução do solo e exerça sua ação herbicida. Normalmente quando a dessecação é realizada em conjunto com outros herbicidas pós-emergentes, é necessário que chuvas já tenham ocorrido previamente para que as condições fisiológicas das plantas daninhas sejam adequadas e não prejudiquem a ação dos produtos. Entretanto, esse é um aspecto positivo que flexibiliza o seu posicionamento em pré-emergência já que a ocorrência de chuvas imediatamente após sua aplicação não prejudicará sua ação de controle, pois o foco não são as plantas presentes e sim seu efeito residual nas sementes das espécies presentes no solo.

Para o agricultor que dessecar sua área após a colheita do milho com o herbicida dicamba em dose comercial (480 g e.a. ha⁻¹), visando o manejo em pré-emergência das plantas daninhas, chuvas de menores intensidades (5 a 35 mm) que ocorrerem até os 15 DAA sob 5 t ha⁻¹ de palha são capazes de disponibilizar entre 61 e 286 g e.a. ha⁻¹ do produto. Essa concentração, somada aos efeitos físicos e químicos fornecidos pela palha, é suficiente para obter controle acima de 80% em todas as espécies avaliadas (Figura 5 B, C, D, E, F, G, H).

A partir de 35 mm de chuva, a quantidade de dicamba que é lixiviada na palha não sofre grandes mudanças, mesmo que as chuvas ocorram no mesmo dia de sua aplicação. Com 35, 50 e 100 mm de chuva aos 0 DAA, apenas 286, 290 e 296 g e.a. ha⁻¹ de dicamba lixiviam na palha de milho (Figura 5 B). Esse padrão se repetiu aos 15 DAA onde apenas 196, 205 e 218 g e.a. ha⁻¹ lixiviam com as mesmas lâminas de chuva (Figura 5 B).

Em termos de ação residual de controle, se novas chuvas ocorrerem sobre a palha que já recebeu 35 mm de chuva, é improvável que a concentração de dicamba liberada seja suficiente para controlar as plantas daninhas avaliadas, já que com essa lâmina de chuva houve a estabilização da lixiviação do herbicida na palha (Figura 5 B). Sendo assim, a palha de milho tem potencial de aumentar o período residual de controle de dicamba somente quando chuvas abaixo de 10 mm ocorrerem. Nessa condição, novas precipitações podem liberar concentrações (60 g e.a ha⁻¹) que ainda podem ser suficientes para exercer ação residual de controle nas

plantas daninhas avaliadas (Figura 5 B, C, D, E, F, G, H). Entretanto, em condições normais de campo, visando o plantio de culturas, onde é comum volumes de chuva superiores a 50 mm, é improvável que a palha prolongue o efeito residual de dicamba no controle das espécies avaliadas.

Em condições de chuvas intensas (100 mm) contínuas, a ação de controle pode ficar prejudicada pois dicamba é um ácido fraco (pK_a 1,87) de elevada solubilidade em água ($400.000 \text{ mg L}^{-1}$) e baixo coeficiente de sorção (K_{oc} 2) (KERLE et al. 2007). Nas condições frequentes de acidez nos solos (pH entre 5,5 e 6,0) grande parte das moléculas podem estar dissociadas e livres na solução. Na forma ácida (dissociada) dicamba é volátil (BEHRENS; LUESCHEN, 1979; BISH et al., 2019; MUELLER et al., 2019) e o risco de perda do produto por volatilização aumenta. Carbonari et al. (2020a) verificaram que dicamba (DGA sem agente redutor de volatilização) apresentou concentrações elevadas de volatilização (9.11 ng cm^{-2}) em solo molhado. Além disso, devido sua baixa sorção e elevada solubilidade em água, a lixiviação no solo pode ser mais intensa e também comprometer a eficácia nas plantas daninhas.

Portanto, a palha demonstrou benefícios físicos e químicos no controle das plantas daninhas ao suprimir seu desenvolvimento e potencializar a ação de dicamba. Além disso, pode contribuir com a redução na volatilização do herbicida, já que na palha esse processo é minimizado quando comparado a deposição do herbicida na parte aérea das plantas (BEHRENS; LUESCHEN, 1979) ou no solo molhado, no caso da formulação DGA sem redutor de volatilização (mesma formulação utilizada nesse experimento) (CARBONARI et al., 2020a). Entretanto, é uma barreira importante na disponibilização de dicamba e diminui sua ação de controle em *E. herophylla* ao reduzir sua concentração que chega no solo (Figura 5 B, G).

Neste sentido, os resultados obtidos nesse experimento evidenciaram que dicamba apresenta uma ação residual importante nas plantas daninhas, inclusive contribuindo com o manejo de espécies monocotiledôneas, o que não ocorre quando se utiliza-o em pós-emergência. Essa informação é de grande importância devido a elevada infestação de *D. insularis* e *E. indica* em várias regiões agrícolas do Brasil. Os principais motivos são a resistência múltipla aos herbicidas inibidores da EPSPS e da ACCase (HEAP, 2021) e a falta de novos herbicidas que as controlem eficientemente em pós-emergência.

Dicamba quando é aplicado na pós-emergência das plantas atua exclusivamente em eudicotiledôneas por não ser bem translocado nas gramíneas e por elas serem capazes de metaboliza-lo rapidamente de forma irreversível em 3,6-dichloro-o-anisic acid (5-OH dicamba), um composto sem atividade herbicida (BROADHURST et al., 1966; CHANG; BORN, 1971). A elevada eficácia na pré-emergência de *D. insularis* e *E. indica* pode estar relacionada com a ausência ou limitação da metabolização de dicamba, já que sua ação residual acontece nas sementes em processo de germinação impedindo a emergência das plântulas.

A ação de dicamba pode também ter interrompido a divisão celular e/ou aumentado a produção de ácido abscísico (ABA), ambos impedindo que as reservas digeridas nas sementes fossem assimiladas para formação de novos tecidos, protrusão da raiz primária e formação da plântula. Em níveis elevados de auxina não ocorre a expressão dos genes necessários para que a célula evolua da fase G1 (síntese e crescimento de proteínas) para a fase S (duplicação do DNA) (DE VEYLDER et al., 2003; DEWITTE; MURRAY, 2003), e também ativa genes que codificam as proteínas responsáveis pela biossíntese de etileno e superprodução de ABA (BADESCU; NAPIER, 2006; TAN et al., 2007; GROSSMANN, 2010; SAUER et al., 2013). ABA inibe a germinação ao reprimir a síntese de enzimas hidrolíticas que são essenciais para a quebra das reservas da semente durante o processo (BEWLEY; BLACK, 1994; TAIZ; ZEIGER, 1998).

3.4 CONCLUSÕES

A persistência de dicamba sal de DGA em palha de milho é alta (entre 37 e 54%) e sua lixiviação aumenta em decorrência do maior volume de chuvas.

Quanto maior o período entre a aplicação de dicamba sal de DGA sobre a palha de milho e a ocorrência da primeira lâmina de chuva, menor é a quantidade lixiviada, independentemente do volume de chuvas simulado.

A baixa concentração de dicamba sal de DGA lixiviada na palha aliada a disponibilidade máxima do herbicida com 35 mm de chuva, é um indicativo de que em condições normais de campo a palha não prolongará seu efeito residual de controle nas plantas daninhas. Entretanto não exige ajuste de dose já que a concentração lixiviada é suficiente para exercer controle acima de 80% nas espécies avaliadas.

A presença da palha de milho na quantidade de 5 t ha⁻¹ sobre o solo reduz a infestação de *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus* e *Eleusine indica* e potencializa a ação de dicamba sal de DGA.

Sem a presença de palha sobre o solo, a dose comercial de dicamba sal de DGA é eficaz na pré-emergência de *Digitaria insularis*, *Conyza* spp., *Bidens pilosa*, *Amaranthus hybridus*, *Euphorbia heterophylla* e *Eleusine indica*.

A ação residual de dicamba sal de DGA permite controlar espécies eudicotiledôneas e monocotiledôneas configurando-se como uma ação importante e complementar ao seu uso em pós-emergência.

REFERÊNCIAS

- ALVES, G. S. et al. Tank contamination and simulated drift effects of dicamba-containing formulations on soybean cultivars. **Agrosystems, Geosciences and Environment**, v. 3, p. 2-11, 2020.
- ABRAHAM, W. The Chemistry behind Low-Volatility Dicamba. **Bulletin Monsanto Co**, Chesterfield, 2018. Disponível em: <https://www.cropscience.bayer.us/-/media/Bayer-CropScience/Country-United-States-Internet/Documents/Roundup-Ready-Xtend-Crop-SystemUpdates/VaporGrip_Technical_Overview_FINAL.ashx?la=en&hash=EE017561780BCBCF09789546E9ED45FF012AF4EB>. Acesso em: 20 set. 2020.
- BALES, S. R.; SPRAGUE, C.L. Tank contamination with dicamba and 2,4-D influences dry edible bean. **Weed Technology**, v. 34, n. 1, p. 89-95, 2020.
- BISH, M. D. et al. Dicamba losses to air after applications to soybean under stable and nonstable atmospheric conditions. **Journal of environmental and Quality**, v. 38, p. 1675–1682, 2019.
- BUOL, J. T. et al. Effect of growth stage on cotton response to a sublethal concentration of dicamba. **Weed Technology**, v. 33, p. 1-8, 2019.
- BUSI, R. et al. Weed resistance to synthetic auxin herbicides. **Pest Management Science**, v. 74, p. 2265-2276, 2018.
- BEHRENS, M. R. et al. Dicamba resistance: Enlarging and preserving biotechnology based weed management strategies. **Science**, v. 316, p. 1185-1188, 2007.
- BADESCU, G. O.; NAPIER, R. M. Receptors for auxin: will it all end in TIRs. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 217–223, 2006.
- BURNSIDE, O. C. The history of 2,4-D and its impact on development of the discipline of weed science in the United States. In: BURNSIDE, O. C. (Coord.). **Biologic and economic assessment of benefits from use of phenoxy herbicides in the United States**: Washington: U.S. Department of Agriculture, 1996. p. 5-16.
- BEWLEY, J. D., BLACK, M. **Seeds: Physiology of Development and Germination**. 2. ed. New York: Plenum Press, 1994. 445 p.
- BEHRENS, R.; LUESCHEN, W. E. Dicamba volatility. **Weed Science**, 1979, v. 27, p. 486–493, 1979.
- BROADHURST, N. A.; MONTGOMERY, M. L.; FREED, V. H. Metabolism of 2-methoxy-3,6-dichloro-benzoic acid (dicamba) by wheat and bluegrass plants. **Journal of agricultural food and chemistry**, v. 14, n. 6, p. 585-588, 1966.

CARBONARI, C. A. et al. Volatilization of standalone dicamba and dicamba plus glyphosate as function of volatility reducer and different surfaces. **Agriculture**, v.10, n. 1, 495, 2020a.

CARBONARI, C. A. et al. Impact of Green Cane Harvesting on Pest Management in Sugarcane. **Outlooks Pest Management**, v. 31, p. 64-73, 2020b.

CUNDIFF, G. T.; REYNOLDS, D. B.; MUELLER, T. C. Evaluation of Dicamba Persistence among Various Agricultural Hose Types and Cleanout Procedures Using Soybean (*Glycine max*) as a Bio-Indicator. **Weed Science**, v. 65, n. 4, p. 305–316, 2017.

CARBONARI, C. A. et al. Dynamics of sunfentrazone applied to sugarcane Crop residues. **Weed Science**, v. 64, n. 1, p. 201-206, 2016.

CARBONARI, C. A. et al. Efeitos de períodos de permanência de clomazone + hexazinona no solo e na palha de cana-de-açúcar antes da ocorrência de chuvas na eficácia de controle de plantas daninhas. **Planta Daninha**, v. 28, n. 1, p. 197-205, 2010.

CARBONARI, C. A. et al. Efeitos de períodos de permanência do flumioxazin no solo e na palha de milho e aveia na eficácia de controle de plantas daninhas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 8, n. 3, p. 85-95, 2009.

CAVENAGHI, A. L. et al. Dinâmica do herbicida amicarbazone (Dinamic) aplicado sobre palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Planta Daninha**, v. 25, n. 4, p. 831- 837, 2007.

CORREIA, N. M.; REZENDE, P. M. Manejo integrado de plantas daninhas na cultura da soja. **Boletim Agropecuário** 51, Lavras, 2002. 55 p. Disponível em: <<http://www.editora.ufla.br/upload/boletim/tecnico/boletim-tecnico-51.pdf>>. Acesso em: 08 jan. 2021.

CHANG, F. Y.; BORN, W. H. V. Dicamba uptake, translocation, metabolism and selectivity. **Weed science**, v. 19, n. 1, p. 113-117, 1971.

DADAZIO, T. S. **Obtenção e análise de espectros de absorção de luz por herbicidas**. 2018. 186 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Proteção de Plantas) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

DERPSCH, T. F.; KASSAM, A.; LI, K. H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v.3, n.1, p. 1-25, 2010.

DEWITTE, W.; MURRAY, J. A. The plant cell cycle. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 54, n. 3, p. 235–264, 2003.

DE VEYLDER, L.; JOUBES, J.; INZE, D. Plant cell cycle transitions. **Current Opinion in Plant Biology**, v. 6, p. 536–543, 2003.

DAO, T. H. Field decay of wheat straw and its effects on metribuzin and S-ethyl metribuzin sorption and elution from crop residues. **Journal of Environmental Quality**, v. 20, n. 1, p. 203-208, 1991.

EGAN, J. F; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A Meta-Analysis on the Effects of 2,4-D and Dicamba Drift on Soybean and Cotton. **Weed science**, v. 62, n. 1, p. 193-206, 2014.

EGAN, J. F.; MORTENSEN, D. A. Quantifying vapor drift of dicamba herbicides applied to soybean. **Environmental Toxicology Chemical**, v. 31, p. 1023–1031, 2012.

FERREIRA, J. H. S. et al. Eficácia do amicarbazone e flumioxazim no controle de *Merremia aegyptia*, *Mucuna aterrima* e *Ricinus communis* no sistema de cana crua. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 19, n. 3. 2020.

FORNAROLLI, D. A. et al. Influência da cobertura morta no comportamento do herbicida atrazine. **Planta Daninha**, v. 16, n. 2, p. 97-107, 1998.

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: Current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science**, v. 66, n. 2, p. 113–120, 2010.

GODOY, M. C. et al. Efeito da cobertura morta de milheto (*Pennisetum americanum*) sobre a eficácia do herbicida metribuzin no controle de *Ipomoea grandifolia* e *Sida rhombifolia*. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 79-86. 2007.

HEAP, I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. **WeedScience.org**, 2021. Disponível em: <<http://www.weedscience.org>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

HEMMINGHAUS, J. W.; MACINNES, A.; ZHANG, J. **Inventors**; Monsanto Technology LLC, Assignee Low Volatility Herbicidal Compositions. U.S. Patent 9,743,664 B2, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017**. Brasil, 2017. Disponível em:<<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/censo-agropecuario/censo-agropecuario-2017>> Acesso em 20 mai. 2020.

JONES, G. T. et al. Off-target movement of DGA and BAPMA dicamba to sensitive soybean. **Weed Technology**, v. 33, p. 51-65, 2019.

JOHNSON, V. A. et al. Cotton, Peanut, and Soybean Response to Sublethal Rates of Dicamba, Glufosinate, and 2,4-D. **Weed technology**, v. 26, n. 2, p. 195-206, 2012.

JUGULAM, M. et al. Evolution of resistance to auxinic herbicides: Historical perspectives, mechanisms of resistance, and implications for broadleaf weed management in agronomic crops. **Weed Science**, v. 59, p. 445-457, 2011.

JOHNSON, B. et al. Weed control in dicamba-resistant soybeans. **Crop Management research**, v. 9, n. 1, p. 1-23, 2010.

KERLE, E. A.; JENKINS, J. J.; VOGUE, P. A. **Understanding Pesticide Persistence and Mobility for Groundwater and Surface Water Protection**. 1. ed. Corvallis: Oregon State University, 2007. p. 1-7.

LEWIS, K. A. et al. An international database for pesticide risk assessments and management. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 22, n. 4, p. 1050-1064, 2016.

LOCKE, M. A.; BRYSON, C. T. Herbicide-soil interaction in reduced tillage and plant residue management systems. **Weed Science**, v. 45, n. 1, p. 307-320, 1997.

LAMOREAUX, R. J.; JAIN, R.; HESS, F. D. **Efficacy of dimethenamid, metolachlor and encapsulated alachlor in soil covered with crop residue**. 3. ed. Gilroy: British crop protection council, 1993. p. 1015-1020.

MUELLER, T. C.; STECKEL, L. E. Dicamba volatility in humidomes as affected by temperature and herbicide treatment. **Weed Technology**, v. 33, p. 541-546, 2019.

MCCOWN, S.; BARBER, T.; NORSWORTHY, J. K. Response of non-dicamba-resistant soybean to dicamba as influenced by growth stage and herbicide rate. **Weed Technology**, v. 32, p. 513-519, 2018.

MCDUGAL, P. Evolution of the Crop Protection Industry Since 1960. **Agribusiness intelligence**, Crop life, 2018. Disponível em: https://agribusinessintelligence.informa.com/~media/informashopwindow/agri/images/samplecontent/reports/pmd_evolution_of_the_crop_protection_industry.pdf. Acesso em 07 jan. 2021.

MUELLER, T.C.; WRIGHT, D.R.; REMUND, K.M. Effect of Formulation and Application Time of Day on Detecting Dicamba in the Air under Field Conditions. **Weed Science**, v.61, n.4, p.586-593, 2013.

MACIEL, C. D. G.; VELINI, E. D. Simulação do caminhamento da água da chuva e herbicidas em palhadas utilizadas em sistemas de plantio direto. **Planta Daninha**, v. 23, n. 3, p. 471- 481, 2005.

MITSCHERLICH, E. A. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtschaftliches Jahrbuch**, v. 38, p. 537-552, 1909.

OU, J. et al. Preemergence Application of Dicamba to Manage Dicamba-Resistant Kochia (*Kochia scoparia*). **Weed Technology**, v. 32, p. 309-313, 2018.

ROSSI, C. V. S. et al. Dinâmica do herbicida metribuzin aplicado sobre palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Planta daninha**, v. 31, n. 1, p. 223-230, 2013.

RADOSEVICH, S. R.; GHERSA, C.; HOLT, J. S. **Weed ecology**: implications for management. 2. ed. New York: Wiley, 1997. 589 p.

REICHARDT, T. **Dinâmica da matéria orgânica e da energia em ecossistemas**. 2. ed. Piracicaba: USP, 1996. 505 p.

REDDY, K. N.; et al. Chlorimuron ethyl sorption and desorption kinetics in soils and herbicide-desiccated cover Crop residues. **Journal of agricultural food and chemistry**, v. 43, p. 2752-2757, 1995.

RODRIGUES, B. N. Influência da cobertura morta no comportamento dos herbicidas imazaquin e clomazone. **Planta Daninha**, v. 11, n. 1, p. 21-8, 1993.

SANTIAGO, A. D. et al. Efficacy and selectivity of herbicides applied in cassava pre-emergence. **Revista caatinga**, v. 31, n. 3, p. 640-650, 2018.

SANCHOTENE, D. M. et al. Desempenho de diferentes herbicidas pré-emergentes para controle de *Euphorbia heterophylla* na cultura da soja. **Perspectiva**, v. 41, n. 155, p. 07-15, 2017.

SAUER, M.; ROBERT, S.; KLEINE-VEHN, J. Auxin: simply complicated. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 7, p. 2565–2577, 2013.

STRACHAN, S. D.; et al. Vapor movement of synthetic auxin herbicides: Aminocyclopyrachlor, Aminocyclopyrachlor-Methyl ester, Dicamba and Aminopyralid. **Weed Science**, v. 58, n. 2, p. 103-108, 2010.

SELIM, H. M.; ZHOU, L.; ZHU, H. Herbicide retention in soil as affected by sugarcane mulch residue. **Journal of Environmental Quality**, v. 32, p. 1445–1454, 2003.

STERLING, T. M.; HALL, J. C. Mechanism of action of natural auxins and the auxinic herbicides. In: ROE, R. M. et al. (Coord.). **Herbicide activity**: toxicology, biochemistry and molecular biology, IOS Press, 1997. p. 111-141.

SWINSCOW, T. D. V. **Statistics at square one**. 9. ed. Campbell: University of Southampton, 1997. 140 p.

STREIBIG, J. C. Herbicide bioassay. **Weed Research**, v. 28, n. 6, p. 479-484, 1988.

TROPALDI, L. et al. Eficácia de herbicidas inibidores da síntese de carotenoides no controle de espécies de capim-colchão. **Revista de ciências agrárias**, v. 4, n. 2, p. 443-453, 2018.

TROPALDI, L. et al. Herbicidas inibidores do fotossistema II em pré-emergência no controle de espécies de capim-colchão. **Revista Brasileira de herbicidas**, v. 16, n. 1, p. 30-37, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TOFOLI, G. R. et al. Dinâmica do tebuthiuron em palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 27, n. 4, p. 815-821, 2009.

TAN, X. et al. Mechanism of auxin perception by the TIR1 ubiquitin ligase. **Nature**, v. 446, n. 1, p. 640–645, 2007.

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Plant Physiology**. 2. ed. Massachusetts: Sinauer Associates, 1998, 792 p.

VELINI, E. D. et al. Dinâmica de Velpar K (hexazinona+diuron) em palha de cana-de-açúcar. In: **XXIV Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas, 2004**. São Pedro. Anais... São Pedro: SBCPD, 2004, p.55.

WATTS, D. W.; HALL, J. K. Tillage and application effects on herbicide leaching and runoff. **Soil and Tillage Research**, v. 39, n. 3-4, p. 241–257, 1996.

WATKINS, D. A. M. Some implications of the photochemical decomposition of pesticides. **Chem. Ind**, v. 5, p. 185–190, 1974.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A palha de milho demonstrou ser uma ferramenta importante no manejo de plantas daninha ao suprimir a emergência de *Amaranthus hybridus*, *Bidens pilosa*, *Conyza* spp., *Digitaria insularis* e *Eleusine indica*.

Os herbicidas 2,4-D sal de colina e dicamba sal de DGA, apesar de serem recomendados na pós emergência de plantas daninhas eudicotiledôneas, apresentaram uma ação pré-emergente importante, inclusive ampliando o espectro de controle ao atuar também em algumas monocotiledôneas como *Digitaria insularis* e *Eleusine indica*. Neste sentido, os herbicidas 2,4-D e dicamba são ferramentas importantes na mitigação da evolução dos casos de plantas daninhas resistentes, pois ampliam as possibilidades de controle sendo um novo mecanismo de ação para algumas espécies monocotiledôneas.

Entretanto, a ação residual desses herbicidas é impactada diretamente pela presença da palha na superfície do solo e pelo regime de chuvas que ocorrem após sua aplicação. De um modo geral, a persistência de 2,4-D sal de colina e dicamba sal de DGA em palha de milho é alta, sendo mais elevada para dicamba, e a lixiviação dos herbicidas na palha aumenta em decorrência do maior volume de chuvas. Além disso, quanto maior o período entre a aplicação de 2,4-D sal de colina e dicamba sal de DGA, sobre a palha de milho, e a ocorrência da primeira lâmina de chuva, menor é a quantidade dos herbicidas que é lixiviada da palha independentemente do volume de chuvas.

Portanto, o regime de chuvas tem impacto direto na ação desses herbicidas. Quando a precipitação é de menor intensidade ou quando ela demora alguns dias para acontecer após a aplicação desses herbicidas a quantidade lixiviada na palha é menor. Entretanto, a ação residual de controle nas plantas daninhas não é prejudicada e também possibilita que o período residual de controle seja prolongado em função de novas precipitações que possam acontecer no decorrer dos dias. Além disso, a palha de milho apresenta uma ação complementar importante na ação de 2,4-D e dicamba permitindo que doses menores sejam eficientes no controle das espécies avaliadas.

Os resultados desses experimentos trazem informações importantes e são muito úteis em tomadas de decisões para o manejo de plantas daninhas. Além disso, abrem portas para que novos estudos sejam conduzidos para melhor

compreensão da dinâmica desses herbicidas no ambiente, tais como os processos de volatilização e fotodegradação em palha nas diferentes formulações de 2,4-D e dicamba disponíveis no mercado. Outra importante lacuna que precisa ser preenchida é entender os mecanismos responsáveis pela atuação dos herbicidas auxínicos na pré-emergência de espécies monocotiledôneas. Entender esses processos serão de grande valia para a ciência das plantas daninhas e certamente trarão inovações importantes para o setor.

REFERÊNCIAS

- BADESCU, G. O.; NAPIER, R. M. Receptors for auxin: will it all end in TIRs. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 217–223, 2006.
- BERKEN, A.; WITTINGHOFER, A. Structure and function of Rho-type molecular switches in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 46, p. 380–393, 2008.
- BEHRENS, M. R. et al. Dicamba resistance: Enlarging and preserving biotechnology based weed management strategies. **Science**, v. 316, p. 1185-1188, 2007.
- BISH, M.D.; BRADLEY, K.W. Survey of Missouri pesticide applicator practices, knowledge, and perceptions. **Weed Technology**, v. 31, n. 1, p. 165–177, 2017.
- BUSI, R. et al. Weed resistance to synthetic auxin herbicides. **Pest Management Science**, v. 74, p. 2265-2276, 2018.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. Auxinic herbicides, mechanisms of action, and weed resistance: A look into recent plant science advances. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 356-362, 2015.
- CHRISTOFFOLETI, P. J.; LÓPEZ-OVEJERO, R. F. **Dinâmica dos herbicidas aplicados na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: USP, 2005. 49 p.
- CONABIO – COMISSÃO NACIONAL DE BIODIVERSIDADE. **Estratégia nacional sobre espécies exóticas invasoras**. Brasil, 2015. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/estruturas/conabio/arquivos/anexoresoluconabio05estrategianacionalespeciesinvasoras/anexoresoluconabio0515.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2021.
- CUNDIFF, G. T.; REYNOLDS, D. B.; MUELLER, T. C. Evaluation of Dicamba Persistence among Various Agricultural Hose Types and Cleanout Procedures Using Soybean (*Glycine max*) as a Bio-Indicator. **Weed Science**, v. 65, n. 4, p. 305–316, 2017.
- DERPSCH, T. F.; KASSAM, A.; LI, K. H. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-25, 2010.
- DEWITTE, W.; MURRAY, J.A. The plant cell cycle. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.54, n.3, p.235–264, 2003.
- DE VEYLDER, L.; JOUBES, J.; INZE, D. Plant cell cycle transitions. **Current Opinion in Plant Biology**, v .6, p. 536–543, 2003.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Plantas daninhas – Perguntas e respostas**. Brasil, 2000. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/tema-plantas-daninhas/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 01 set. 2020.

EGAN, J. F.; BARLOW, K. M.; MORTENSEN, D. A. A Meta-Analysis on the Effects of 2,4-D and Dicamba Drift on Soybean and Cotton. **Weed science**, v. 62, n. 1, p. 193-206, 2014.

GEORGE, E. F. **Plant Propagation by Tissue Culture**. 1. ed. Berlin: Springer, 1963. p. 115–173.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Transforming food and agriculture to achieve the sdgs**. Rome, 2018. Disponível em: < <http://www.fao.org/3/I9900EN/i9900en.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2021.

GROSSMANN, K. Auxin herbicide action: lifting the veil step by step. **Plant Signaling & Behavior**, v. 2, n. 5, p. 421-425, 2007.

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science**, v. 66, n. 1, p. 113–120, 2009.

HERTEL, R.; THOMPSON, K. S.; RUSSO, V. E. A. In-vitro auxin binding to particulate cell fractions from corn coleoptiles. **Planta**, v. 107, n. 7, p. 325–340, 1972.

HEAP, I. The International Herbicide-Resistant Weed Database. **WeedScience.org**, 2021. Disponível em: <<http://www.weedscience.org>>. Acesso em: 12 jan. 2021.

JONES, G. T. et al. Off-target movement of DGA and BAPMA dicamba to sensitive soybean. **Weed Technology**, v. 33, p. 51-65, 2019.

JOHNSON, V. A. et al. Cotton, Peanut, and Soybean Response to Sublethal Rates of Dicamba, Glufosinate, and 2,4-D. **Weed technology**, v. 26, n. 2, p. 195-206, 2012.

KALSING, A. et al. Effect of Formulations and Spray Nozzles on 2,4-D Spray Drift under Field Conditions. **Weed Technology**, v. 32, p. 379–384, 2018.

MAESHIMA, M. Tonoplast transporters: Organization and function. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 52, n. 1, p. 469-497, 2001.

MANUCHEHRI, M. R. et al. Non–2,4-D–resistant cotton response to glyphosate plus 2,4-D choline tank contamination. **Weed Technology**, v. 34, n. 1, p. 82-88, 2020.

MICHELET, B.; BOUTRY, M. The plasma membrane H⁺-ATPase (a highly regulated enzyme with multiple physiological functions). **Plant Physiology**, v. 108, n. 1, p. 1-6, 1995.

MONSHAUSEN, G. B.; GILROY, S. Feeling green: mechanosensing in plants. **Trends in Cell Biology**, v. 19, n. 8, p. 228-235, 2009.

MUELLER, T. C.; WRIGHT, D. R.; REMUND, K. M. Effect of Formulation and Application Time of Day on Detecting Dicamba in the Air under Field Conditions. **Weed Science**, v. 61, n. 4, p. 586–593, 2013.

POZO, J. C. et al. The balance between cell division and endoreplication depends on E2FC-DPB, transcription factors regulated by the ubiquitin- SCFSKP2A pathway in Arabidopsis. **Plant Cell**, v. 18, n. 3, p. 2224–2235, 2006.

POZO, J. C.; BONIOTTI, M. B.; GUTIERREZ, C. Arabidopsis E2F2 functions in cell division and is degraded by the ubiquitin- SCFAtSKP2 pathway in response to light. **Plant Cell**, v. 14, n. 4, p. 3057– 3071, 2002.

RODRÍGUEZ-SERRANO, M. et al. 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid promotes S-nitrosylation and oxidation of actin affecting cytoskeleton and peroxisomal dynamics. **Journal of Experimental Botany**, v. 237, n. 1, p. 1-11, 2014.

RODRIGUES, B. N. Influência da cobertura morta no comportamento dos herbicidas imazaquin e clomazone. **Planta Daninha**, v. 11, n. 1/2, p. 21-28, 1993.

SAUER, M.; ROBERT, S.; KLEINE-VEHN, J. Auxin: simply complicated. **Journal of Experimental Botany**, v. 64, n. 7, p. 2565–2577, 2013.

SAUER, M.; KLEINE-VEHN, J. Auxin binding protein 1: the outsider. **The Plant Cell**, v. 23, n. 6, p. 2033–2043, 2011.

TAN, X. et al. Mechanism of auxin perception by the TIR1 ubiquitin ligase. **Nature**, v. 446, n. 1, p. 640–645, 2007.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TROMAS, A.; PAPONOV, I.; PERROT-RECHENMANN, C. Auxin binding protein 1: Functional and evolutionary aspects. **Trends in Plant Science**, v. 15, n. 8, p. 436–446, 2010.

VELINI, E. D. Comportamento de herbicidas no solo. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE MANEJO DE PLANTAS DANINHAS EM HORTALIÇAS, 1992, Botucatu. **Anais...** Botucatu, SP: UNESP, 1992. p. 44-64.

WOLF, S.; HÉMATY, H.; HERMAN, K. Growth control and cell wall signaling in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, n. 3, p. 381-407, 2012.

WRIGHT T. R. et al. Robust crop resistance to broadleaf and grass herbicides provided by aryloxyalkanoate dioxygenase transgenes. **Proceedings of the national academy of sciences of the united states of America**, v. 47, n. 23, p. 20240-20245, 2010.

ZHOU, X. et al. Metabolism and Residues of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid in DAS-40278-9 Maize (*Zea mays*) Transformed with Aryloxyalkanoate Dioxygenase-1 Gene. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 40, p. 7438–7444, 2016.