

IZABELA THAIS DOS SANTOS

MÉTODO PARA ESTUDAR A DINÂMICA DE HERBICIDAS EM PALHA

Botucatu

2019

IZABELA THAIS DOS SANTOS

MÉTODO PARA ESTUDAR A DINÂMICA DE HERBICIDAS EM PALHA

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini

Coorientadora: Dr^a. Ivana Paula Ferraz Santos de Brito

Botucatu

2019

S237m Santos, Izabela Thais dos
Método para estudar a dinâmica de herbicidas em
palha / Izabela Thais dos Santos. -- Botucatu, 2019
69 p. : il., tabs., fotos

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas,
Botucatu
Orientador: Edivaldo Domingues Velini
Coorientadora: Ivana Paula Ferraz Santos de Brito

1. Cana de açúcar. 2. Herbicida. 3. Metodologia. 4.
Transposição. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: “MÉTODO PARA ESTUDAR A DINÂMICA DE HERBICIDAS EM PALHA”

AUTORA: IZABELA THAÍS DOS SANTOS

ORIENTADOR: EDIVALDO DOMINGUES VELINI

COORIENTADORA: IVANA PAULA FERRAZ SANTOS DE BRITO

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



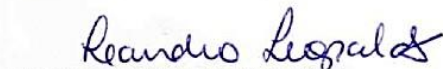
Prof. Dr. EDIVALDO DOMINGUES VELINI

Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrônômicas - UNESP - Câmpus de Botucatu



Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI

Departamento de Produção Melhoramento Vegetal-FCA/UNESP / Botucatu/SP



Prof. Dr. LEANDRO TROPALDI

Coordenadoria de engenharia Agrônômica / FCAT/Unesp Dracena

Botucatu, 18 de julho de 2019.

Dedico, aos meus amados pais, Antônio e Lucimar, meu irmão Antônio e irmãs Edvânia, Priscila e Nicéria, meus queridos sobrinhos Alan, Bernardo e Olívia e afilhada Roberta.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, São Miguel Arcanjo e Nossa Senhora Aparecida por todas as bênçãos e graças concedidas ao longo dessa caminhada;

Aos meus amados pais, Antônio dos Santos e Lucimar Souza dos Santos pela dedicação, paciência, carinho e amor que contribuiu para minha formação;

Ao meu irmão, Antônio Júnior que plantou as primeiras sementes do conhecimento em meu coração e por anos as cultivou;

As minhas irmãs, Edvânia Cristina, Priscila Taís e Nicéria Thaís pela força que me deram e pelos momentos maravilhosos que juntas passamos;

Aos meus sobrinhos Alan Teixeira, Bernardo Realino e Olívia Taís e a minha afilhada Roberta por todo carinho tornando minha caminhada cada vez mais leve;

Ao meu marido, Guilherme por todo companheirismo, amizade e paciência;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, por partilhar com generosidade seus conhecimentos, pelo apoio e oportunidades durante meu mestrado, pelos seus ensinamentos e paciência;

Ao professor Dr. Caio Antonio Carbonari, serei muito grata pela ajuda e disponibilidade durante o mestrado, partilhando seu conhecimento;

A minha co-orientadora Ivana Paula Ferraz Santos de Brito, por sua infinita paciência, pela amizade, e belos ensinamentos que somente a academia não é capaz de nós proporcionar, pela confiança e grande apoio no desenvolvimento dessa pesquisa;

Aos doutores que participaram dessa banca muito obrigada pela disponibilidade e suas contribuições para aperfeiçoamento deste trabalho;

As amigas Ana Matos, Carolane Silva, Gisleide Santos, Ivana Ferraz, Jéssica Bonamichi e Valesca Miranda por toda paciência, companheirismo, ensinamentos e pelos momentos alegres que passamos no decorrer dos nossos dias de trabalho.

Aos amigos de longas datas que compartilharam na construção da minha vida acadêmica e que até hoje guardo e compartilho dos ensinamentos que a mim foram confiados.

Aos colegas e funcionários do Nupam que contribuíram no desenvolvimento deste trabalho, vale ressaltar Ana de Assis, Cláudio, Vandrei, José Guilherme, José Roberto e Luis Marcelo que dedicaram seu tempo para construção dessa pesquisa.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de Mestrado concedida.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Agricultura) e à Faculdade de Ciências Agronômicas, pela oportunidade e formação;

Enfim, gostaria de agradecer a todas as pessoas que entraram na minha vida, e acreditaram no meu sonho, apoiando-me, com palavras, gestos, sorrisos, tornando a caminhada um pouco mais branda.

RESUMO

Com a proibição da realização de queimadas para a colheita da cana-de-açúcar, e a implantação da colheita mecanizada, foi originado o sistema de produção denominado cana crua. Nele há o acúmulo de grandes quantidades de resíduos na superfície do solo após a colheita, sendo a cultura implantada sobre essa palhada. Nesse sistema a camada de palha pode interferir na dinâmica dos herbicidas, pois é uma barreira a ser transposta até atingir o solo. Visando obter informações acerca da dinâmica de diferentes produtos, o objetivo desse trabalho foi avaliar a transposição de herbicidas simulando aplicações direto na palha e diluída na água de chuva em palha de cana-de-açúcar. O estudo realizado no NUPAM, visando determinar a dinâmica de transposição dos herbicidas atrazine, diuron, fomesafen, glyphosate, haloxyfop-p-methyl, hexazinone, indaziflam, S-metolachlor e sulfentrazone em palha de cana-de-açúcar. Utilizou-se delineamento inteiramente ao acaso, com quatro repetições, sendo a palha utilizada cortada em 0,5 x 0,5 cm e acondicionada em cápsulas de polietileno. Tendo 9 tratamentos x 3 épocas experimentais x 2 condições. Sendo a primeira condição, a simulação da chegada do herbicida na superfície da palha após a aplicação direta da calda com pipeta de repetição de 40 µL do volume de calda de cada produto por unidade experimental, enquanto na segunda condição, foi simulada a chegada do herbicida na palha após a ocorrência de chuvas, com 40 µL do volume de calda de cada produto aplicado por unidade experimental durante a simulação de 25 mm de chuva. Logo após foram simuladas lâminas acumuladas de chuva de 25, 50, 75 e 100 mm e de 50, 75 e 100 mm para o primeiro e segundo experimento, respectivamente. A determinação dos herbicidas nas soluções foi realizada por meio de análises cromatográficas utilizando o sistema LCMS/MS. Os dados foram submetidos aos testes de normalidade e homogeneidade, e posteriormente submetidos à análise de variância pelo teste F, com as médias comparadas pelo teste t ($p < 0,05$). Foram ajustados modelos de regressão não-linear de Mitscherlich para demonstrar a transposição dos herbicidas da palha após a simulação de chuva. Os herbicidas aplicados simulando diluída na água de chuva em palha em 10 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar na chuva de 100 mm foram divididos em três grupos com transposição acima de 70% a 90% (indaziflam, fomesafen, hexazinone, diuron, atrazine e sulfentrazone), seguido de 40% a 60% (haloxyfop-p-methyl e glyphosate) e 10% a 30% (S-metolachlor). Enquanto, na aplicação direta na palha a porcentagem dos herbicidas traspostos foram de 70% a 90% (fomesafen e sulfentrazone), 40% a 60% (glyphosate, diuron, hexazinone e atrazine) e 10% a 30% (haloxyfop-p-methyl, S-metolachlor e indaziflam). Para a maioria dos produtos as características físico-químicas, principalmente a solubilidade favorece a transposição dos herbicidas. Conclui-se que, para os herbicidas estudados a chegada na superfície da palha em aplicações em diluída na água de chuva em palha promove maior transposição na palha de cana-de-açúcar.

Palavras-chave: Cana de açúcar. Herbicida. Metodologia. Transposição.

ABSTRACT

With the burning fires prohibition for the sugarcane harvesting, and the mechanized harvest implantation, the production system called raw cane was originated. There is accumulation of large amounts of residues on the soil surface after harvest, and the crop is implanted on this straw. In this system the straw layer may interfere with herbicide dynamics, since it is a barrier to be transposed until reaching the ground, and in order to obtain information about the dynamics of different products, the objective of this work was to evaluate the herbicides transposition simulating direct applications in straw and diluted in rainwater in sugarcane straw. The study was carried out at NUPAM, aimed to determine the transposition dynamics of the herbicides atrazine, diuron, fomesafen, glyphosate, haloxyfop-p-methyl, hexazinone, indaziflam, S-metolachlor and sulfentrazone in sugarcane straw. A completely randomized design with four replications was used, the straw being cut into 0.5 x 0.5 cm and packed in polyethylene capsules. Having 9 treatments x 3 times experimental x 2 conditions. Being the first condition, the simulation of herbicide arrival on the straw surface after the direct application of the syrup with a 40 μ L repeating pipette of each product volume per experimental unit, while in the second condition, the herbicide arrival was simulated in the straw after the occurrence of rain, with 40 μ L of the volume of syrup of each product applied per experimental unit during the 25 mm rainfall simulation. Soon after, 25, 50, 75 and 100 mm accumulated rain blades and 50, 75 and 100 mm were simulated for the first and second experiments, respectively. The herbicides determination in the solutions was performed by means of chromatographic analyzes using the LCMS / MS system. Data were submitted to normality and homogeneity tests and were subsequently submitted to variance analysis by the F test, with the means compared by the t test ($p < 0.05$). Mitscherlich nonlinear regression models were fitted to demonstrate the transposition of the straw herbicides after the rain simulation. The herbicides applied simulating diluted in straw rainwater in 10 t ha⁻¹ of sugarcane in the 100 mm rain were divided into three groups with transposition above 70% to 90% (indaziflam, fomesafen, hexazinone, diuron, atrazine and sulfentrazone), followed by 40% to 60% (haloxyfop-p-methyl and glyphosate) and 10% to 30% (S-metolachlor). While in the direct application on straw the percentage of the transposed herbicides was 70% to 90% (fomesafen and sulfentrazone), 40% to 60% (glyphosate, diuron, hexazinone and atrazine) and 10% to 30% (haloxyfop-p-methyl, S-metolachlor and indaziflam). For most of the products the physical-chemical characteristics, mainly the solubility favors the herbicides transposition. It is concluded that, for the herbicides studied, the arrival on the surface of the straw in diluted application in rainwater applications promotes greater transposition in the sugarcane straw.

Keywords: Sugar cane. Herbicides. Methodology. Transposition.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1	Cana-de-açúcar	17
2.2	Palhada	18
2.3	Características físico-química dos herbicidas	20
2.4	Caracterização dos herbicidas	21
2.5	Formulações dos herbicidas	25
2.6	Metodologias de avaliação da transposição de herbicidas em palha ...	26
3.	MATERIAL E MÉTODOS	28
3.1	Análises dos experimentos	32
3.2	Análise estatística.....	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Herbicida atrazine	38
4.2	Herbicida diuron.....	40
4.3	Herbicida fomesafen	43
4.4	Herbicida glyphosate	45
4.5	Herbicida Haloxypop-p-methyl.....	47
4.6	Herbicida hexazinone	49
4.7	Herbicida indaziflam	52
4.8	Herbicida S-metolachlor	55
4.9	Herbicida sulfentrazone	57
5	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) tem grande importância no agronegócio brasileiro. O Brasil possui a maior área cultivada com cana no mundo, cerca de 8.382,2 milhões de hectares, responsáveis pela produção de 620,41 milhões de toneladas na safra 2018/19. Com relação à produtividade, a estimativa é de 72.231 kg ha⁻¹, obtidos na safra 2017/18 (CONAB, 2019).

No sistema tradicional de cultivo de cana-de-açúcar a colheita é realizada utilizando a queima do canavial para despalha, no intuito de facilitar esse processo (SPAROVEK; SCHNUG, 2001), uma vez que, a palha é considerada material de descarte. No entanto, devido à Lei Estadual 11.241/02 do estado de São Paulo, com a colheita das plantas realizada sem queimadas, ocorre a manutenção e o acúmulo de grandes quantidades de resíduos de colheita na superfície do solo, sendo a cultura implantada em áreas de palhada, dá-se origem ao sistema de produção denominado cana crua.

De acordo com Fornarolli et al. (1998) o sistema de plantio direto apresenta uma série de vantagens em relação ao sistema convencional em relação a proteção do solo contra os processos erosivos, redução da comunidade infestantes.

Assim como no sistema cana crua, o sistema de plantio direto para culturas anuais tem a palhada sobre o solo e assim se beneficiando de todos os atributos que a cobertura morta acarreta. Essa proteção influencia no transporte do herbicida no solo devido a sua interceptação sobre a superfície da palhada bem como a dinâmica comportamental dos herbicidas aplicados para os determinados sistemas de produção.

O desenvolvimento desse sistema tornou ainda mais complexo o manejo de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar, que já lidava anteriormente com inúmeras variáveis envolvidas, como a época de plantio, a modalidade de plantio, e os tratos culturais. A germinação e emergência de plantas daninhas também foi influenciada pela presença da camada de palha sobre o solo, assim como a dinâmica dos herbicidas aplicados nessas áreas, e a quantidade do produto que chega ao solo (VELINI; NEGRISOLI, 2000).

Nas aplicações feitas sobre a palha, é necessário que o herbicida transponha a camada de palha heterogênea para o controle das plantas daninhas, e compreender a dinâmica deste sistema é fundamental (MATOS et al., 2016). Tanto os herbicidas

aplicados em pré-emergência, quanto aqueles utilizados em pós-emergência podem entrar em contato com plantas ou com a superfície da palha no momento da aplicação.

A ocorrência de chuvas e/ou irrigações após a aplicação pode transportar os herbicidas diretamente da palha ao solo ou das plantas ao solo, tendo a palha como um compartimento intermediário.

As metodologias que são empregadas atualmente para estudar a transposição de herbicidas de palha para o solo conta com a utilização de métodos de bioensaio, pulverizador estacionário e simulador de chuva em campo com posterior análise cromatográfica das soluções obtidas desses equipamentos.

Desse modo, o objetivo do trabalho foi desenvolver um método correspondente a um sistema de aplicação de herbicidas e simulação de chuva e avaliar a dinâmica de transposição dos herbicidas (atrazine, diuron, fomesafen, glyphosate, haloxyfop-p-methyl, hexazinone, indaziflam, S-metolachlor e sulfentrazone) pela palha quando aplicado diretamente sobre a palha ou na lâmina de chuva simulando o herbicida que é carregado diretamente das plantas para a palha.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é cultivada em mais de 100 países, sendo os principais produtores Brasil, Índia e China (FAO, 2019). No Brasil a área total a ser colhida é estimada em 8.382,2 mil hectares (CONAB, 2019). A produção estimada para a safra de 2019/20, é de 615,98 milhões de toneladas, sendo os principais estados produtores: São Paulo (323.416,4 mil t – 52,5%), Goiás (73.015,9 mil t – 11,9%) e Minas Gerais (64.110,6 mil t – 10,4%) (CONAB, 2019). A importância da cana-de-açúcar na economia brasileira vai desde o setor de biocombustíveis ao alimentício (CONAB, 2019), sendo os principais produtos gerados: etanol, açúcar, cachaça, rapadura, garapa, torta de filtro, alimentação animal, geração de energia elétrica, dentre outros.

A agroindústria sucroalcooleira nacional, permite a produção de combustível de fonte renovável. O aumento da demanda mundial por etanol, associado às amplas áreas de cultivo e condições edafoclimáticas adequadas à cana-de-açúcar, torna o Brasil competitivo na participação da comercialização mundial (CONAB, 2019).

No cultivo da cana-de-açúcar era comum a prática de queimadas, a fim de facilitar a colheita da cultura. Entretanto, essa prática deixou de ser empregada pelo setor sucroalcooleiro devido às pressões de órgãos ambientais e a população entorno. De acordo com a Lei Estadual 11.241/02 do estado de São Paulo, ficou estabelecido a eliminação gradativa da queima da palha até 2021 para áreas mecanizáveis e até 2031 para áreas não mecanizáveis (declividade acima de 121%). Contudo, o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, antecipou estes prazos para os anos de 2014 e 2017 em áreas mecanizáveis e não mecanizáveis, respectivamente.

As áreas agrícolas de canavicultura, com seus respectivos valores de produtividade, em conformidade com a variedade utilizada, práticas de manejo e proibição da queima, podem gerar diferentes quantidade de palha, no geral partindo de 5 t ha⁻¹ e alcançando valores superiores a 20 t ha⁻¹ de palha (VITTI et al., 2008; CORREIA; DURIGAN, 2004; TRIVELIN et al., 1995).

2.2 Palhada

A palha tem assumido em todo mundo lugar de destaque tanto pelos seus benéficos como por suas funcionalidades. No Brasil, a adoção de sistemas como: plantio direto de culturas anuais, cultivo mínimo e sistema de produção cana crua, vêm sendo benéfico em diversas regiões agrícolas devido aos atribuídos da cobertura morta (VELINI; NEGRISOLI, 2000; TOFOLI, 2009).

No entanto, essa proteção influencia no transporte do herbicida no solo devido a sua interceptação sobre a superfície da palhada bem como a dinâmica comportamental dos herbicidas aplicados para os determinados sistemas de produção. De acordo com Tofoli (2004) o acréscimo do teor de matéria orgânica no solo, devido a presença da cobertura morta, tende a exercer forte sorção dos herbicidas, limitando a sua eficiência.

No sistema cana crua a palhada de cana-de-açúcar, mantida sobre o solo é constituída pelas folhas secas, verdes e os ponteiros, sendo, uma biomassa vegetal predominantemente lignocelulósica (lignina, hemiceluloses e celulose), que representa aproximadamente 14% (base seca) de toda a cana colhida (SZCZERBOWSKI et al., 2014). É um material heterogêneo e pode variar de acordo com as práticas agrícola empregadas, e suas diferentes características podem influenciar no processo de transposição dos herbicidas.

O plantio direto é considerado uma prática conservacionista, que consiste na semeadura sobre a palhada da cultura anterior ou de plantas cultivadas para essa finalidade, além de plantas daninhas dessecadas. Esta prática é considerada por diversos autores muito vantajosa em relação ao sistema convencional (GERARD et al., 1988; DERPSCH et al., 1991; CASSEL et al., 1995; POTTER et al., 1995; DERPSCH, 1997; CABEZAS, 1998). Devido aos aspectos de proteção do solo, redução das comunidades infestantes (FORNAROLLI et al., 1998).

A cobertura com palha, influencia no comportamento dos herbicidas aplicados, sendo que, estes ficam retidos e dispostos aos processos degradativos ou podem ser lixiviados e as vezes não é o suficiente para o controle das plantas daninhas.

Em áreas que utilizam o sistema cana-crua, sabe-se que grande quantidade deste resíduo permanece no solo após a colheita, acarretando mudanças nas práticas de manejo dos canaviais, seja no transito de máquinas (MICHELAZZO; BRAUNBECK,

2008), na fertilidade do solo (SPAROVEK; SCHNUG, 2001), no manejo de plantas daninhas, utilização de defensivos agrícolas (ROSSI et al., 2013; CARBONARI et al., 2010; CORREIA; DURIGAN, 2004), e no manejo de irrigação (CHEONG; TEELUCK, 2016).

O sombreamento nas entrelinhas com palhiço pode alterar a composição, o nível de infestação das plantas daninhas e a eficácia dos herbicidas (CONCENÇO et al., 2017). É importante entender a dinâmica dos herbicidas na palha, para evitar a aplicação de super e sub dosagem nestas áreas, evitando o desperdício de produto e melhorando o controle de plantas daninhas (RODRIGUES et al., 1998).

A prática de enleiramento e enfardamento é bastante empregada em áreas de canavicultura e consiste na retirada do palhiço que permanece sobre o solo, e pode ser empregada nas usinas como fonte de energia, além de reduzir a densidade de palhada e auxiliar na transposição do herbicida, podendo beneficiar a chegada do produto ao alvo de interesse em menor volume de chuva e/ou irrigação, obtendo o melhor controle de plantas daninhas (CONCENÇO et al., 2017).

A palhada influencia no comportamento dos herbicidas aplicados, uma vez que áreas com maior densidade de palha o herbicida tende a ficar mais retido, nas camadas inferiores da palha, e/ou até mesmo na superfície e podem estar propensos aos processos degradativos (FORNAROLLI et al., 1998). Em todo caso, a retenção dos herbicidas na palha pode mitigar a transposição por chuvas ou irrigações (REDDY et al., 1995), dificultando a chegada do produto ao solo, e consequentemente reduzindo a eficácia de controle das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar, além de evitar contaminação do lençol freático.

Herbicidas que possuem ação no solo aplicados em pré e pós-emergência das culturas e plantas daninhas, podem atingir a palha de duas maneiras. A primeira ocorre logo após a aplicação, com a deposição de gotas na superfície da palha; enquanto a segunda ocorre após o produto ser depositado na superfície das folhas, e atingirem a palha por escorrimento, ou após a ocorrência das primeiras chuvas e/ou irrigações. Com isso, os herbicidas são expostos aos processos de retenção e degradação antes mesmo de atingir o solo, em ambas as modalidades de aplicação.

Segundo Fornarolli et al. (1998) e Rodrigues et al. (1998), alguns herbicidas são mais retidos que outros pelas coberturas mortas, devido as características físicas e químicas de cada produto bem como a intensidade e origem do material vegetal

disponível na área e épocas de ocorrência de precipitação após aplicação dos herbicidas.

Diversas moléculas são utilizadas nesses sistemas, para aplicação em pré e pós-emergência, porém, os estudos que relatam o controle de plantas daninhas em pré-emergência em sistemas de cultivo com palha são os mais comuns. Para os herbicidas em pós-emergência ainda é necessário dedicar esforços para elucidar seu comportamento na palha.

2.3 Características físico-química dos herbicidas

O herbicida interceptado pela palha pode ficar suscetível à volatilização, e fotólise, até ser transposto para o solo. Sabe-se que o processo de transporte depende da densidade de palha e da sua capacidade de retenção, além das características físico-químicas das moléculas, bem como da formulação e do período de chuva que sucede a aplicação. Nesse processo há influência das características como coeficiente octanol-água (K_{ow}), coeficiente de sorção (K_{oc}) e solubilidade densidade podem interferir na dinâmica do herbicida no ambiente.

O K_{ow} é um parâmetro que está ligado à lipofilicidade dos herbicidas e à sua capacidade de migrar para o solvente orgânico apolar (octanol) ou polar (água). O valor de K_{ow} representa a capacidade de adsorção das moléculas do herbicida ao solvente, e desse modo, quanto maior o valor de K_{ow} , menor será a capacidade de adsorção por conta da baixa afinidade com a água, permanecendo na solução do solo. Contudo, se o K_{ow} apresentar valor menor, as moléculas possuirão maior adsorção e são conhecidas por hidrofílicas, apresentando maior solubilidade (SILVA; SILVA, 2007). Os herbicidas apolares/hidrofóbicos ($K_{ow} > 10.000$) e polares/hidrofílicos ($K_{ow} < 10$) geralmente possuem uma maior capacidade de adsorção à fração orgânica dos coloides do solo e uma maior afinidade em relação à fração mineral, respectivamente (MATOS, 2014).

O K_{oc} representa o coeficiente que gera estimativa da tendência de partição do herbicida da fase líquida para a matéria orgânica do solo (SCHWARZENBACH et al., 1993). De acordo com Vidal (2002) o K_{oc} e K_{ow} podem apresentar alta correlação, uma vez que, a sorção de compostos lipofílicos é muito relacionada à fração orgânica do solo. Observa-se que o valor de K_{oc} apresenta alta variabilidade devido a heterogeneidade da matéria orgânica do solo (CHRISTOFFOLETI et al., 2008).

A solubilidade é a capacidade do herbicida de torna-se solúvel em água em uma dada temperatura, sendo expressa pela quantidade máxima que este pode estar dissolvido em água, a uma temperatura específica, até a saturação da solução. Essa característica é a mais importante dos herbicidas para estudo em palhada, pois confere ao herbicida maior ou menor capacidade de transpor a palha para chegar ao solo por meio do sistema de plantio direto (CHRISTOFFOLETI et al., 2008).

Herbicidas com alta solubilidade (polares/hidrofílicos) tendem a ficar mais disponíveis na solução do solo, podendo apresentar menor retenção e sofrer maior dessorção, estando mais propensos à transposição (MATOS, 2014).

2.4 Caracterização dos herbicidas

Para a cultura da cana-de-açúcar são recomendados mais de trinta compostos com ação herbicida, que podem ser empregados em aplicações de forma isolada ou em mistura em pré e/ou pós-emergência (RODRIGUES; ALMEIDA, 2018). Em sistema de cana crua a utilização de herbicidas de pré-emergência, necessita de ultrapassar a barreira de palhada para realizar o controle das plantas daninhas antes da emergência, normalmente a ação destes herbicidas são no solo e dependendo da característica do herbicida, a quantidade de palha na superfície do solo, o período e intensidade de ocorrência de chuvas e/ou irrigação são fundamentais para obter alta taxa de transposição do produto ao solo.

Os produtos aplicados em pós-emergência das plantas daninhas e da cultura normalmente são pulverizados na superfície das plantas, por este motivo deve-se atentar para a seletividade do produto evitando a fitotoxicidade da cultura.

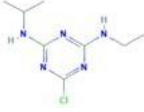
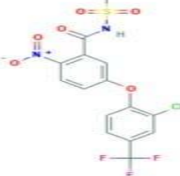
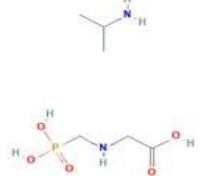
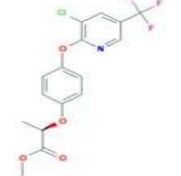
De acordo com Azania et al. (2005; 2006) quando herbicida de pós-emergência aplicado em épocas de estiagem as plantas recuperaram-se dos efeitos fitotóxicos dos herbicidas mais facilmente em relação as plantas de épocas de chuva, deste modo a seletividade torna-se um fator muito importante, pois as injúrias podem ser mais severas.

Os herbicidas como atrazine, diuron, fomesafen, glyphosate, hexazinone, indaziflam, S-metolachlor e sulfentrazone apresentam diferentes características físico-químicas (Quadro 1) que influenciam na transposição destes produtos na palha para

o solo por meio de lavagem das plantas aplicadas ou da aplicação direta na superfície da palhada após precipitações e/ou irrigações.

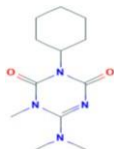
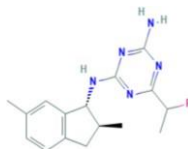
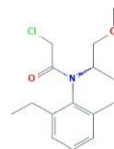
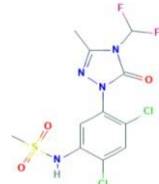
p

Quadro 1 – Fórmulas estruturais e propriedades físico-químicas dos herbicidas

Herbicida	Atrazine	Diuron	Fomesafen	Glyphosate	Haloxifop-P-methyl
Fórmula estrutural					
Fórmula molecular	$C_8H_{12}ClN_5$	$C_9H_{10}Cl_2N_2O$	Sal - $C_{15}H_9ClF_3N_2O_6S$ Ácido - $C_{15}H_{10}ClF_3N_2O_6S$	Sal IPA ^{1/} - $C_6H_{17}N_2O_5P$ Ácido - $C_3H_8NO_5P$	$C_{16}H_{13}ClF_3NO_4$
IUPAC nomenclatura	6-chloro-N2-ethyl-N4-isopropyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine	3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea	5-(2-Chloro-4-(trifluoromethyl)phenoxy)-N-(methylsulfonyl)-2-nitrobenzamide	2-(phosphonomethylamino)acetate	methyl (R)-2-{4-[3-chloro-5-(trifluoromethyl)-2-pyridyloxy]phenoxy}propionate
Grupo químico	Triazina	Fenilureia	Difeniléter	Glicina substituída	Ariloxifenoxipropionato
Peso molecular (g mol ⁻¹)	215,69	233,09	Sal - 460,74 Ácido - 438,76	Sal IPA- 228,19 Ácido – 169,7	375,73
Densidade (g mL ⁻¹ a 20°C)	1,2	1,48	1,28	1,74	0,968
Solubilidade em água (mg L ⁻¹ a 25°C, pH 7)	35 (baixa)	42 (baixa)	Sal - 600.000 (alta) Ácido – 50 (baixa)	Sal IPA - 900.000 (alta) Ácido – 15.700 (alta)	7,9 (baixa)
Log K _{ow}	2,70 (moderado)	2,87 (moderado)	-1,20 (baixo)	-3,22 (baixo)	4,07 (alto)
pKa a 25°C	1,7 (base fraca)	Não-ionizável	2,7 (ácido fraco)	2,3 (ácido fraco)	4,33 (ácido fraco)
Pressão de vapor (mPa a 25°C)	0,04 (baixa volatilidade)	1,15 x 10 ⁻³ (baixa volatilidade)	4,00 x 10 ⁻³ (baixa volatilidade)	0,01 (baixa volatilidade)	0,055 (baixa volatilidade)
K _{oc} (mL g ⁻¹)	100 (moderadamente móvel)	480 (pouco móvel)	60 (móvel)	20.000 (pouco móvel)	75 (moderadamente móvel)
GUS (índice de potencial de lixiviação)	3,20 (alto)	1,83 (transição)	3,18 (alto)	-0,25 (baixo)	3,70 (alto)

^{1/}IPA – sal isopropylamine; SHANER (2014); PPDB (2019).

Quadro 1 – Continuação

Herbicida	Hexazinone	Indaziflam	S-metolachlor	Sulfentrazone
Fórmula estrutural				
Fórmula molecular	C ₁₂ H ₂₀ N ₄ O ₂	C ₁₆ H ₂₀ FN ₅	C ₁₅ H ₂₂ ClNO ₂	C ₁₁ H ₁₀ Cl ₂ F ₂ N ₄ O ₃ S
IUPAC nomenclatura	3-cyclohexyl-6-dimethylamino-1-methyl-1,3,5-triazine-2,4(1H,3H)-dione	<i>N</i> -[(1 <i>R</i> ,2 <i>S</i>)-2,3-dihydro-2,6-dimethyl-1 <i>H</i> -inden-1-yl]-6-[(1 <i>R</i> <i>S</i>)-1-fluoroethyl]-1,3,5-triazine-2,4-diamine	2-chloro- <i>N</i> -(2-ethyl-6-methylphenyl)- <i>N</i> -(1-methoxypropan-2-yl)acetamid	2',4'-dichloro-5'-(4-difluoromethyl-4,5-dihydro-3-methyl-5-oxo-1 <i>H</i> -1,2,4-triazol-1-yl)methanesulfonanilide
Grupo químico	Triazinona		Cloroacetamida	Aril triazolinona
Peso molecular (g mol ⁻¹)	252,32	301,36	283,80	387,19
Densidade (g mL ⁻¹ a 20°C)	1,25	1,23	1,12	0,53
Solubilidade em água (mg L ⁻¹ a 25°C, pH 7)	33.000 (alta)	2,8 (baixa)	480 (moderada)	780 (alta)
Log K _{ow}	1,17 (baixo)	2,8 (moderado)	3,05 (alto)	0,99 (baixo)
pKa a 25°C	2,2 (base fraca)	3,5 (ácido fraco)	Não-ionizável	6,56 (ácido fraco)
Pressão de vapor (mPa a 25°C)	0,03 (baixa volatilidade)	2,5 x 10 ⁻⁵ (baixa volatilidade)	3,7 (baixa volatilidade)	1,30 x 10 ⁻⁴ (baixa volatilidade)
K _{oc} (mL g ⁻¹)	54 (móvel)	1000 (pouco móvel)	200 (moderadamente móvel)	43 (móvel)
GUS (índice de potencial de lixiviação)	4,43 (alto)	2,18 (transição)	1,91 (transição)	6,16 (alto)

SHANER (2014); PPDB (2019).

2.5 Formulações dos herbicidas

Os herbicidas podem apresentar diferentes formulações para o mesmo princípio ativo, de acordo com o fabricante. A escolha do produto deve levar em consideração a época de aplicação, o sistema a ser empregado e o intervalo, a quantidade e intensidade da ocorrência de precipitação e/ou irrigação, que irão influenciar na eficiência de controle das plantas daninhas (ANDERSON; ARNOLD, 1984).

Os produtos são formulados de diferentes formas e estas influenciam sua persistência. De acordo com Guimarães (1987), as formulações solúveis em água são rapidamente lavadas das plantas pela chuva e/ou irrigação, porém, os molháveis persistem por mais tempo, apresentam absorção pelas plantas demorada, e ficam expostos aos processos degradativos como a fotodecomposição, e tendem a volatilizar menos.

A formulação SC, suspensão concentrada, é constituída por uma suspensão estável de ingredientes ativos num veículo, que pode conter outros ingredientes ativos para aplicação após a diluição. Neste tipo de formulação, o princípio ativo sólido (micropartículas) é mantido suspenso em água e necessita de constante agitação. Para formulação concentrado solúvel, SL, é líquida, com natureza lipofílica, quando adiciona em água forma uma calda homogênea, sem precipitados. Na formulação WG granulado dispersível, é sólido, consiste na combinação do ingrediente ativo em uma partícula de argila moída e outros ativos que melhoram a suspensão em água, quando misturado na calda de aplicação na qual é incorporado a um espalhante adesivo (surfatante) quando necessário e manter em agitação constante para obter uma solução homogênea por mais tempo. Já a formulação em concentrado emulsionável (EC) o produto apresenta solvente não-polar e para ser dissolvido na calda de aplicação precisa ser diluído em água, e adicionar adjuvante com o sistema de agitação em funcionamento para homogeneização da calda (MIGUELA; CUNHA, 2010; ULGUIM; KRUSE, 2019).

Tendo em vista esses comportamentos diferenciados, nesse trabalho utilizou-se herbicidas comerciais, em formulações SC (atrazine, indaziflam e sulfentrazone), SL (fomesafen e glyphosate), WG (diuron e hexazinone) e EC (haloxyfop-p-methyl e S-metolachlor).

2.6 Metodologias de avaliação da transposição de herbicidas em palha

É encontrado na literatura metodologias para o estudo da transposição e dinâmica do herbicida na palha. Abaixo serão descritas três delas de acordo com os seguintes autores.

A utilização de bioensaio também é empregada para auxiliar a quantidade de herbicida transposto da palha por meio da fitointoxicação de plantas indicadoras. Fornarolli (1998), para aplicar as doses de atrazine utilizou o pulverizador pressurizado a CO₂, equipado com barra contendo 6 bicos de jato leque plano do tipo defletor denominado Turbo Teejet TT 11002, sob pressão de 200 quilo pascal, velocidade de 4,5 km hora⁻¹, proporcionando um volume de 200 L ha⁻¹ de calda, a uma altura de 30 cm do solo, aplicando o herbicida atrazine em solos que apresentam dois níveis cobertura (4,5 e 9,0 t ha⁻¹). Após 24 horas da aplicação do herbicida, foi empregada uma irrigação de 20 mm por aspersão a fim de proporcionar a lixiviação do herbicida da palha para o solo. No dia seguinte, foram novamente coletadas as amostras de solo para a realização dos bioensaios e análises cromatográficas de resíduos de atrazine. Constatando que a ocorrência de chuva após a aplicação de atrazine na palha, auxilia na transposição acarretando melhora na eficiência de controle.

Matos (2018); Carbonari et al. (2016); Araldi et al. (2015); Rosi et al. (2013), Tofoli et al. (2009), Cavenaghi et al. (2007) utilizaram um pulverizador estacionário acoplado com uma barra de pulverização constituída por quatro pontas (XR 11002), espaçadas de 0,5 m e posicionadas a uma altura de 0,5 m em relação à superfície dos alvos e das cápsulas de laminado de polipropileno e cloreto de polivinila (PVC) onde foram colocadas 10 t ha⁻¹ de palha para aplicação dos herbicidas. O sistema foi operado com velocidade de deslocamento de 3,6 km h⁻¹, com volume de calda correspondente a 200 L ha⁻¹ e pressão constante de 150 kPa pressurizado por ar comprimido. Para a simulação de chuva utilizou-se uma bomba hidráulica com pressão constante e acionamento automático. A água do reservatório foi bombeada até a barra de chuva com altura de 1,45m em relação à superfície das unidades experimentais, com três pontas de pulverização TK-SS-20 de alta vazão, espaçadas de 0,5 m e posicionadas de forma a propiciar maior uniformidade da chuva na área aplicada, para a realização do deslocamento da barra a velocidade aplicada foi de 0,187 km h⁻¹ e pressão de trabalho de 0,81 kgf cm⁻². Cada passagem do simulador

correspondeu a uma lâmina aplicada de aproximadamente 2,5 mm de chuva (ROSSI et al., 2013). Após o emprego das lâminas de chuvas a solução transposta de cada unidade experimental foram coletadas para realização de análises cromatográficas. Estes pesquisadores concluíram que os herbicidas diuron, sulfentrazone e metribuzin foram transpostos em 10 t ha⁻¹ palha após serem submetidos a 35 mm, 20 mm e 21,5 mm de chuva, correspondendo a extração de 66%, 76,5% e 99%.

Souza (2004) construiu um simulador capaz de simular chuva em campo em uma área pré-definida para o melhor desempenho do equipamento é necessário que ajuste o equipamento de acordo com a necessidade da pesquisa. Este simulador é constituído por uma armação retangular, apoiada sobre quatro pernas reguláveis para uma altura de 3 metros sobre a superfície do solo. No centro da armação há um bico aspersor tipo Veejet, 80100 da “Spraying Systems Company” de Chicago, USA.

Quando em funcionamento, esse bico oscila sobre uma área de 1 metro de lado, isolada do restante da parcela por um delimitador, e o número de oscilações é controlado por um sistema mecânico. A água empregada é retirada do reservatório e injetada no bico por uma bomba e a pressão de saída do bico é mantida constante em 4 kgf cm⁻² (6 PSI). Esse simulador é capaz de auxiliar na movimentação de moléculas de herbicidas como descrito por Vaz (2016) que comparou o potencial de retenção dos herbicidas hexazinone e diuron em palhada de cana de açúcar e constatou que o período de chuva de três dias e a permanência de 7 t ha⁻¹ de palha reduz a perda do diuron, porém, para o hexazinone devido à sua alta solubilidade, há alta taxa de transposição.

Para Confessor et al. (2019) a precipitação simulada pode obter uma grande variação no efeito da energia de impacto das gotas e da intensidade da precipitação na dinâmica de herbicidas no ambiente e pode apresentar alta correlação em função ao desprendimento e arraste de partículas dos herbicidas aplicados sobre palha, no entanto, Meyer e Harmon (1992) evidenciaram, ainda, a importância do conhecimento da energia cinética da precipitação aplicada por simuladores de chuvas, visto que as condições de chuva natural tem impacto maior no sistemas de solo, quando comparadas com as chuvas artificiais, caso a precipitação simulada possua características de tamanho de gotas, velocidade terminal de gotas e energia cinética inferiores às das chuvas naturais (Confessor et al. 2019).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em laboratório, no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM), (22° 51' 00.09"S e 48° 25' 25.89"W Gr.), pertencente ao Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal da Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp, Câmpus de Botucatu – SP.

Foram realizados 9 experimentos visando determinar a dinâmica de transposição dos herbicidas atrazine, diuron, fomesafen, glyphosate, haloxyfop-p-methyl, hexazinone, indaziflam, S-metolachlor e sulfentrazone, de palha de cana-de-açúcar. Os experimentos simularam duas condições de aplicações, sendo a aplicação sobre a palha, e a chegada dos herbicidas na superfície da palha após a primeira lâmina de chuva (Quadro 2).

Quadro 2– Caracterização do experimento

Delineamento experimental	Inteiramente ao acaso com 9 herbicidas x 4 repetições x 3 épocas experimental x 2 condições	
Área de aplicação	15,59 cm ²	
Quantidade de palha	10 t ha ⁻¹	
Dose	40 µL da calda de cada produto (equivalendo, a 250 L ha ⁻¹ de calda)	
Condição de aplicação	Chegada do herbicida na superfície da palha após a aplicação com pipeta de repetição	Chegada do herbicida a palha após a ocorrência do primeiro 25 mm chuva
Lâminas de chuva	25, 50, 75 e 100 mm	50, 75 e 100 mm

Os herbicidas foram aplicados por meio de produtos comerciais nas doses descritas no Quadro 3, em cápsulas de polipropileno preenchidas com palha de cana-de-açúcar no volume equivalente a 10 t ha⁻¹. A palha utilizada nos experimentos foi

coletada diretamente de plantas sem aplicação anterior de herbicidas, cortadas em 0,5 x 0,5 cm, pesadas, e acondicionadas nas cápsulas.

Quadro 3 – Doses utilizadas de cada herbicida testados

Herbicidas	Produtos Comerciais	Dose g i.a. ha⁻¹	Formulação
Atrazine	Nortox	2515,00	SC
Diuron	Velpar K	1481,28	WG
Fomesafen	Flex	314,38	SL
Glyphosate	Roundup transorb R	1207,20	SL
Haloxypop-p-methyl	Verdict R	75,45	EC
Hexazinone	Velpar K	414,98	WG
Indaziflam	Alion	94,31	SC
S-metolachlor	Dual gold	1810,80	EC
Sulfentrazone	Boral	754,50	SC

SC – suspensão concentrada, WG – granulado dispersível, SL- concentrado solúvel, EC – concentrado emulsionável.

O equipamento utilizado para a aplicação dos herbicidas e para a simulação das diferentes lâminas de chuva dos experimentos, é denominado como simulador estacionário e funciona com o auxílio de uma fonte de energia, onde aciona um motor de 12 volts, conectado a dois redutores.

O sistema é composto por uma placa fixa, onde são acopladas 32 seringas de 60 mL de volume, preenchidas com água ou com caldas, e uma outra móvel, fixada em correias, que se desloca horizontalmente por 18 cm, exercendo força sobre os êmbolos, até alcançar a placa fixa. A água presente nas seringas, correspondentes aos volumes das lâminas desejadas, com a pressão exercida pela placa móvel sob os êmbolos, é injetada em mangueiras plásticas com o diâmetro de 3,3 mm, à 1,5 cm de altura da superfície da cápsula (Figura 1).

Essas mangueiras são acopladas em uma estrutura perfurada, que se desloca horizontalmente, enquanto o tubo coletor com a cápsula faz um movimento rotacionado de 360°, permitindo a distribuição uniforme da água por toda a área da cápsula (Figura 2).

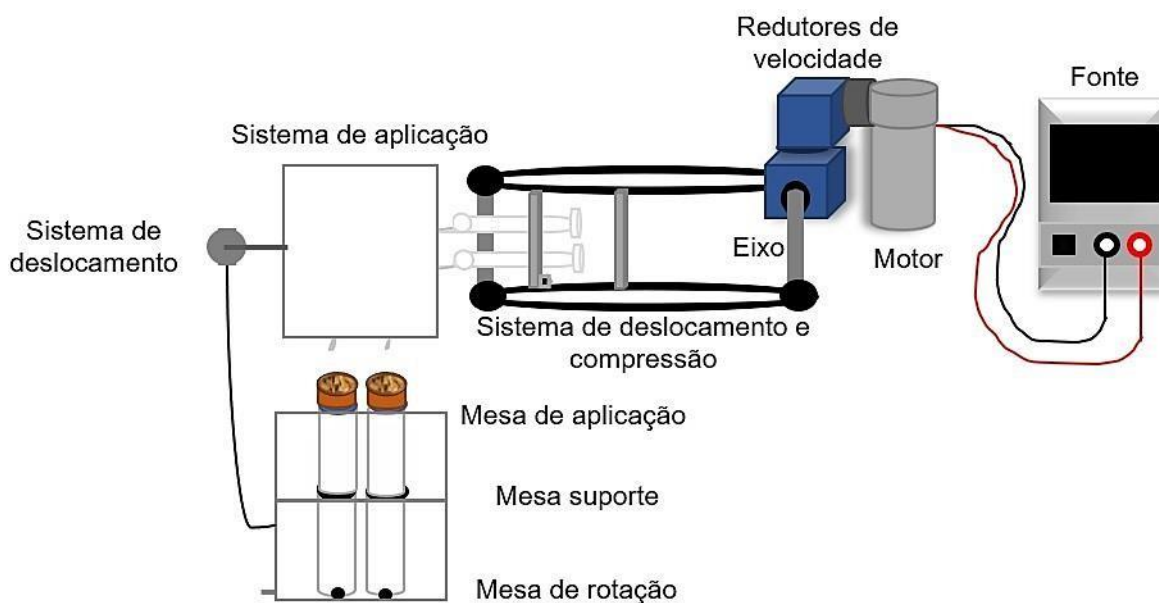
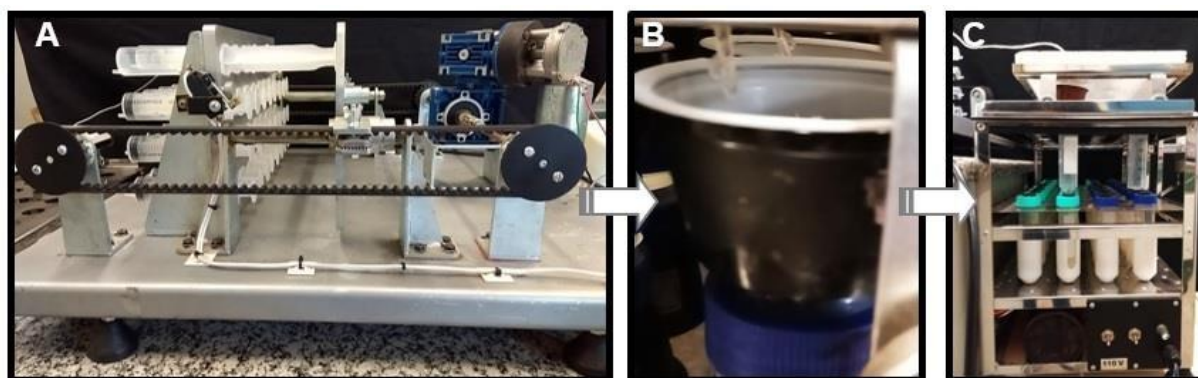
Figura 1 – Esquema do simulador estacionário

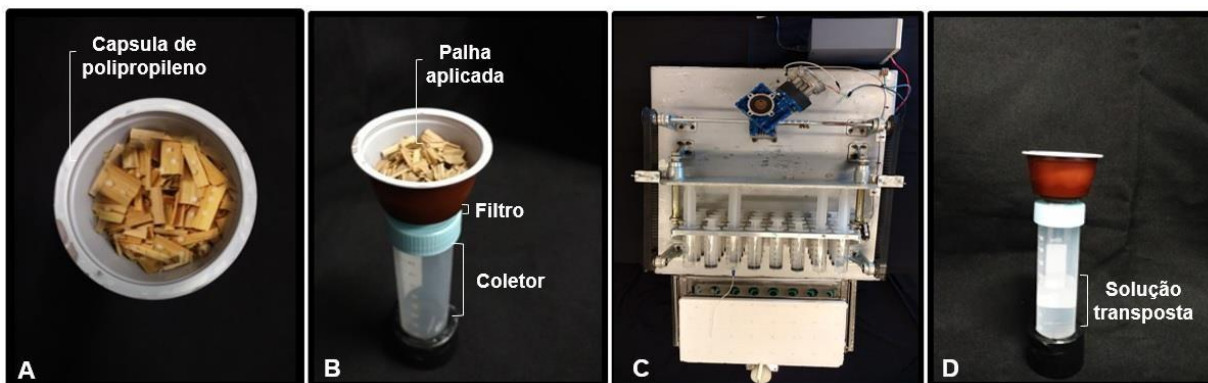
Figura 2 – Sequência das estruturas do equipamento. A) Compressão das seringas; B) Tubo falcon com a cápsula no momento da aplicação; C) Solução transposta sendo coletada



A chegada do produto a palha foi com auxílio de pipeta de repetição, foi aplicado 40 μL da calda de cada produto por unidade experimental (cápsulas contendo palha). Uma hora após aplicação foram simuladas lâminas de chuvas, acumulando-se 25, 50, 75 e 100 mm (Figura 3).

Após atingir os volumes de chuva determinados, as soluções transpostas da palha de cana-de-açúcar foram coletadas e armazenadas para posterior análise cromatográfica.

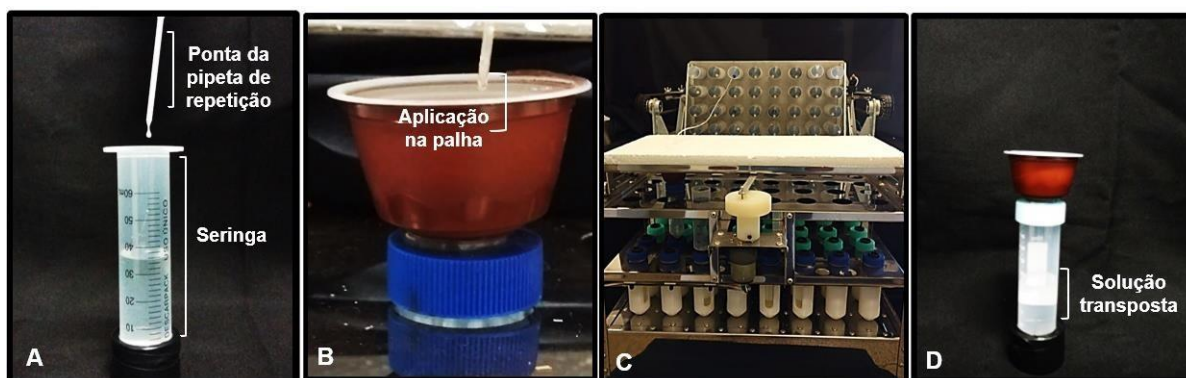
Figura 3 – Condição de aplicação. A) palha aplicada com pipeta de repetição; B) estrutura utilizada; C) mesa de aplicação e simulação de chuva com visão superior; D) coleta da água da chuva



Esta segunda condição a calda de aplicação foi diluída em volume de água, simulando a lavagem das plantas alvos após a ocorrência de chuvas e/ou irrigações, foram aplicados 40 μ L da calda de cada produto por unidade experimental, nos primeiros 25 mm de chuva. Logo após foram realizadas as demais simulações de chuva, acumulando lâminas de 50, 75 e 100 mm (Figura 4).

Ao atingir os volumes de chuva determinados, as soluções transpostas da palha de cana-de-açúcar foram coletadas e armazenadas para posterior análise cromatográfica.

Figura 4 – Condição de aplicação. A) preparo da calda; B) chegada o herbicida na palha; C) mesa de aplicação e simulação de chuva; D) coleta da solução



3.1 Análises dos experimentos

Para a determinação dos herbicidas nas soluções transpostas utilizou-se um sistema LC-MS/MS, composto por um cromatógrafo líquido de alta eficiência (Proeminence UFLC, Shimadzu Corporation), acoplado a um espectrômetro de massas (4500, Triple Quad, AB Sciex) híbrido triplo quadrupolo, que apresenta alta sensibilidade e repetibilidade, com baixo ruído e medição simultânea de vários compostos, bem como, mantém uma relação constante entre a intensidade do sinal (área do pico cromatográfico) e a concentração dos diferentes compostos expressa em unidades molares. As condições cromatográficas para a quantificação dos compostos foram descritas Quadro 3.

Quadro 3 – Condições cromatográficas utilizadas para a quantificação dos herbicidas transpostos pela palha em diferentes lâminas de chuva

Coluna analítica	Synergi 2.5µ Hydro-RP 100Å, dimensões 50 x 4,6 mm	
Volume de injeção	20µl	
Fase móvel (pH 7,0)	Fase A (FA) = 0,5% acetato de amônio em água; Fase B (FB) = 0,5% acetato de amônio em metanol.	
Gradiente	2 min = 20% FB e 80% FA 4 min = 95% FB e 5% FA 7 min = 95% FB e 5% FA 9 min = 20% FB e 80% FA 11 min = 20% FB e 80% FA	
Fluxo	0,6 ml min ⁻¹	
Temperatura do forno	40 °C	
Herbicidas	Equação	Tempo de retenção
Atrazine	$y = -1.31e+003x^2 + 4.72e+005x + 9.79e+003$ $r^2 = 0.9994$	5,44
Diuron	$y = -5.38x^2 + 3.7e+003x + 1.51e+003$ $r^2 = 0.9914$	5,45
Fomesafen	$y = -527 x^2 + 1.24e+005x + 9.87e+003$ $r^2 = 0.9931$	5,20
Glyphosate	$y = 4.71e+003 x - 554$ $r^2 = 0.9983$	0,71
Haloxypop-p-methyl	$y = 2.14e+005 x + 7.86e+004$ $r^2 = 0.9978$	5,85
Hexazinone	$y = -2.18e+004 x^2 + 2.04e+006 x + 5.8e+005$ $r^2 = 0.9964$	5,28
Indaziflam	$y = -3.75e+004 x^2 + 3.06e+006 x + 7.69e+004$ $r^2 = 0.9995$	5,69
S-metolachlor	$y = -3.02e+004 x^2 + 2.98e+006 x + 6.62e+005$ $r^2 = 0.9964$	5,74
Sulfentrazone	$y = 1.48e+004 x + 1.81e+003$ $r^2 = 0.9955$	5,06

Quadro 4. Parâmetros do LC-MS/MS otimizados para os compostos no modo de ionização positivo e negativo

Composto	Massa Molecular	Íons Secundários (Fragmentos)	Tempo (msec)	DP	EP	CE	CXP
Atrazina	216.011	174.0	30	51	10	23	6
	216.011	104.0		51	10	35	8
	216.011	96.0		51	10	31	6
Diuron	234.034	72.0	30	31	4,5	37	4
	234.034	73.1		31	4,5	41	4
	234.034	174.0		31	4,5	15	4
Fomesafen	436.861	285.9	30	-65	-10	-30	-9
	436.861	316.1		-65	-10	-30	-11
	436.861	194.8		-65	-10	-44	-17
Haloxifop-p-methyl	376.110	315.9	30	96	10	23	28
	376.110	288.0		96	10	33	10
	376.110	91.1		96	10	35	8
Hexazinona	253.054	170.9	50	1	10	21	14
	253.054	85.1		1	10	39	8
	253.054	83.1		1	10	41	6
Indaziflan	302.102	158.1	100	66	10	23	4
	302.102	138.0		66	10	35	10
	302.102	145.0		66	10	33	10
S-metolachlor	284.140	251.9	30	41	10	21	4
	284.140	176.1		41	10	35	6
	284.140	134.0		41	10	43	12
Sulfentrazone	386.707	306.9	20	101	10	27	10
	386.707	273.0		101	10	39	10
	386.707	145.9		101	10	53	10
Glyphosate	167.923	63.1	30	-25	-3,5	-34	-10
	167.923	78.8		-25	-3,5	-58	-18
	167.923	150.2		-25	-3,5	-14	-26

O tempo total de corrida para os herbicidas estudados foram de 20, 30 e 100 segundos, com retenção na coluna de cromatográfica é de 0,71 para o glyphosate e em média 5,0 minutos para os demais compostos, e apresentando um alto coeficiente de determinação para todos os herbicidas empregados. Nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13 estão apresentados, os cromatogramas dos compostos estudados.

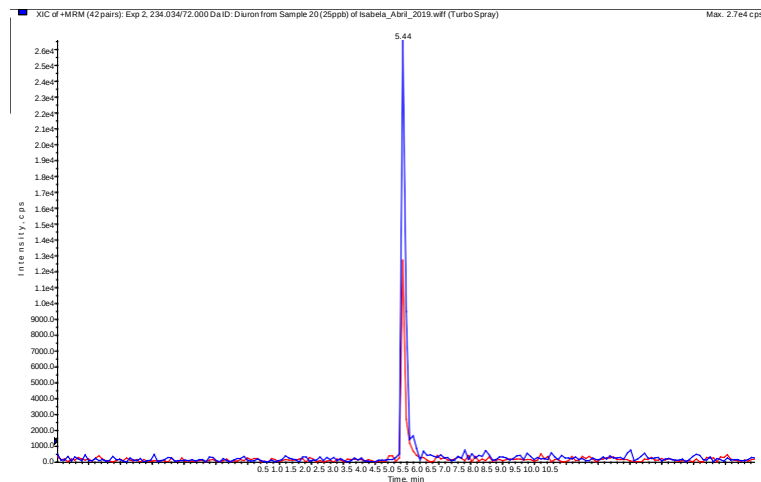
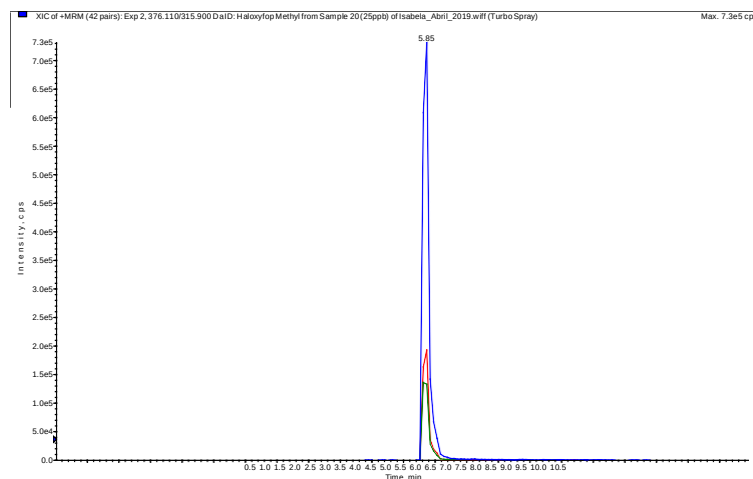
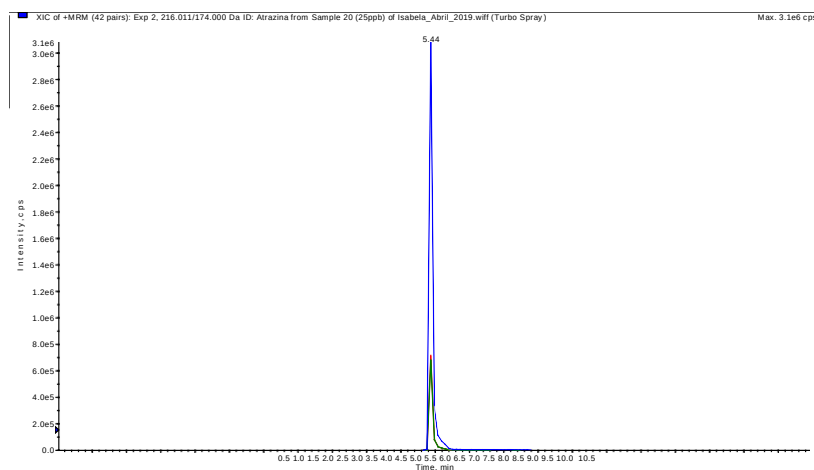
Figura 5 – Cromatograma obtido para o atrazine (50 L⁻¹)**Figura 6 – Cromatograma obtido para o diuron (50 L⁻¹)****Figura 7 – Cromatograma obtido para o fomesafen (50 L⁻¹)**

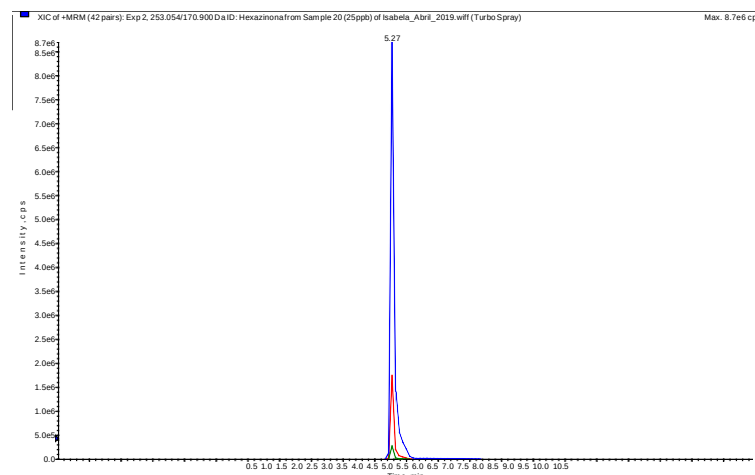
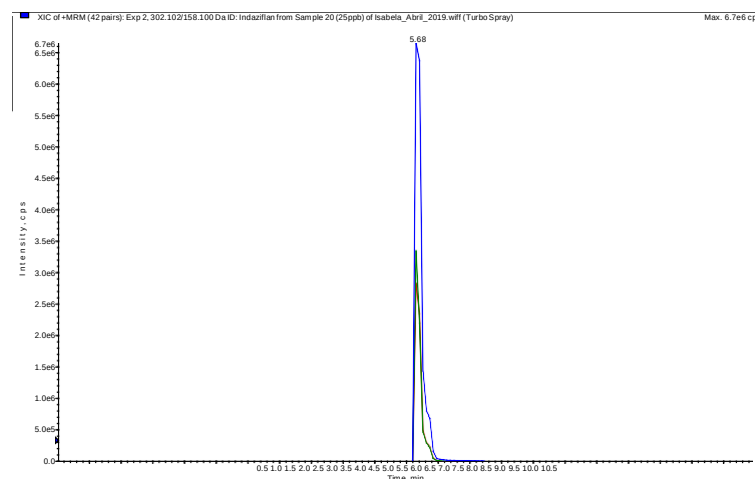
Figura 8 – Cromatograma obtido para o glyphosate (50 L⁻¹)**Figura 9 – Cromatograma obtido para o haloxyfop-p-methyl (50 L⁻¹)****Figura 10 – Cromatograma obtido para o hexazinone (50 L⁻¹)**

Figura 11 – Cromatograma obtido para o indaziflam (50 L⁻¹)

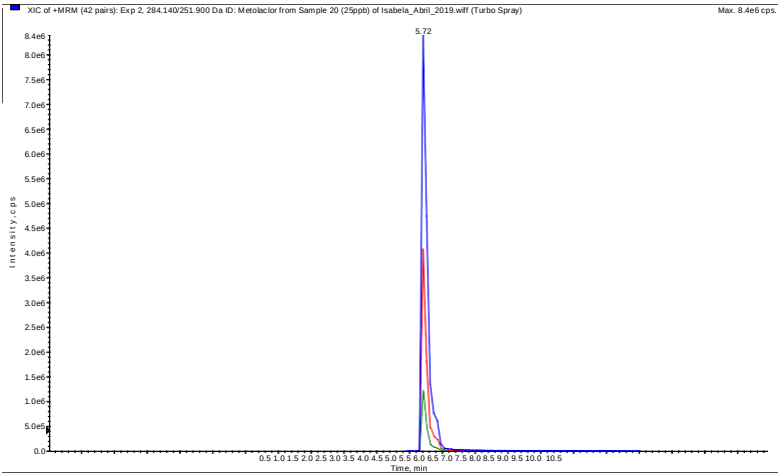


Figura 12 – Cromatograma obtido para o S-metolachlor (50 L⁻¹)

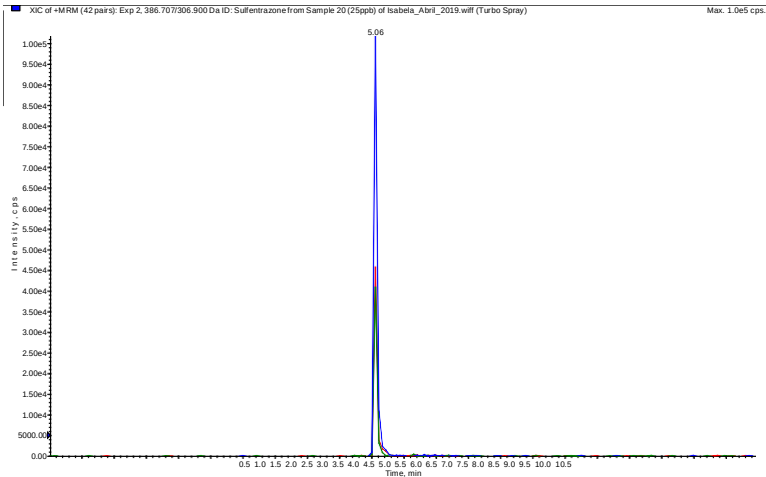
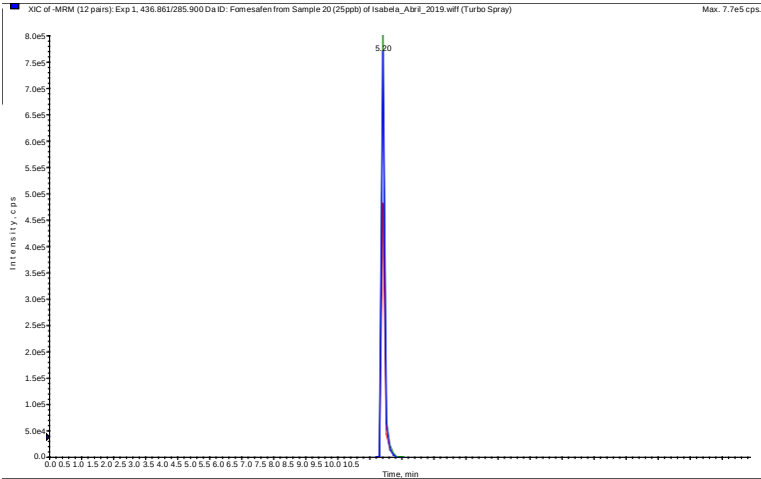


Figura 13 – Cromatograma obtido para o sulfentrazone (50 L⁻¹)



3.2 Análise estatística

Os dados obtidos nas análises cromatográficas foram corrigidos em função do volume de chuva realizado e convertidos em g ha⁻¹ de i.a.

Para análise dos resultados foram realizados inicialmente os testes de normalidade e homogeneidade, seguindo os preceitos estatísticos. Posteriormente os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste t ($p \leq 0,05$).

Para determinar o comportamento da transposição dos herbicidas ao longo dos volumes de chuva simulados, foram ajustados modelos de regressão não-linear de Mitscherlich adaptado (Mitscherlich, 1909)

$$y = a(1 - 10^{-c(0+x)}) \quad (1)$$

Em que a e c correspondem aos parâmetros da equação. O a é a assíntota do modelo, que corresponde ao máximo do herbicida transposto, o c é a concavidade da curva, que determina a velocidade de saída do herbicida da palha. O x é o volume de chuva necessário para transpor o herbicida (mm), e o y a quantidade total de herbicida transposto da camada de 10 t ha⁻¹ de palha.

Os dados obtidos das condições de aplicação direto na palha e pela lâmina de chuva foram comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Visando alcançar elevada precisão experimental, considerando que esse trabalho tem por objetivo avaliar uma nova metodologia experimental, os experimentos foram conduzidos em triplicata. Os ensaios foram conduzidos em condições laboratoriais, e as análises estatísticas realizadas de modo conjunto para as três épocas, pois não havia nenhuma hipótese experimental que pudesse validar a análise individual e a comparação dos resultados obtidos em cada experimento.

As análises estatísticas foram realizadas pelo programa estatístico SAS (STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM, SAS Institute, version 9.1.3, Carry, North Carolina, USA), sendo os gráficos elaborados pelo Sigmaplot (SYSTAT SOFTWARE, versão 12.0, San Jose).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse trabalho foi desenvolvida uma metodologia alternativa para simular chuva e avaliar a dinâmica de herbicidas em palha utilizando os dois métodos de aplicação descritos. Dessa forma, foi possível variar as lâminas de chuva aplicadas e empregar volumes idênticos e pré-estabelecidos em cada unidade experimental, assim como, pré-diluir os herbicidas em água, simulando as primeiras chuvas ocorridas após uma aplicação em campo, com uniformidade em toda a área tratada, porém, praticamente sem impacto das gotas com a palha.

O segundo método de aplicação foi utilizado para representar as condições em que o herbicida pode ter sido lavado de plantas ou de camadas superiores da palhada. Entretanto, esta pesquisa não permite estudar a facilidade de retirada dos herbicidas a partir dos alvos em que se depositaram inicialmente, mas a facilidade que o herbicida diluído ou suspenso em água teve em passar ou ser retido pela palha.

4.1 Herbicida atrazine

Para o herbicida atrazine, os resultados obtidos nas análises de quantificação das soluções transpostas da palha de cana-de-açúcar apresentaram diferenças significativas e interação entre os fatores estudados (Tabela 1). A comparação entre a simulação de aplicações realizadas diretamente na palha e na chegada do produto na lâmina de chuva evidenciaram que a transposição do produto foi superior quando ele foi adicionado à água da chuva simulando o transporte ao solo após uma aplicação em pós-emergência em áreas com presença de palha.

Tabela 1 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida atrazine após a simulação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 2515,00 g i.a. ha⁻¹

Lâmina Mm	Aplicação de herbicidas	
	direto na palha	atrás da chuva na palha g i.a. ha ⁻¹
25	949,18 Bc	1958,23 Ab
50	1334,83 Bb	2229,77 Aa
75	1578,62 Bab	2266,97 Aa
100	1744,60 Ba	2282,17 Aa
F aplicação		285,228*
F lâmina de chuva		28,053*
F aplicação x lâmina		5,156*
CV (%)		7,31

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a $p \leq 0,05$.

Esses resultados permitiram o ajuste de modelos de Mitscherlich, com alto coeficiente de determinação (R^2), sendo as estimativas dos parâmetros apresentadas na Tabela 2. A assíntota do modelo (a) representa a estimativa da máxima transposição do herbicida pela água de chuva; enquanto o parâmetro c , representa e é proporcional à facilidade com que ocorre o transporte do composto com a aplicação de lâminas crescentes de chuva. Os modelos foram ajustados para a condição com aplicação sobre a palha e com aplicação diluída na água de chuva.

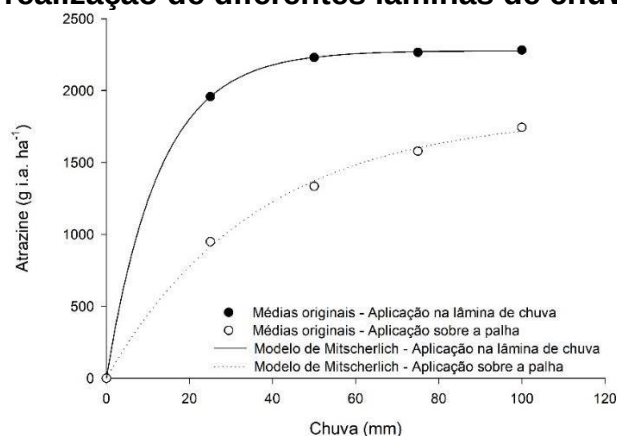
Tabela 2 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida atrazine transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha^{-1}), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	a	b	c	R^2	F
Direto na palha	1833,0000	0	0,0120	0,9995	3141,320**
Diluída na água de chuva	2277,3000	0	0,0341	0,9999	5067,090**

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

Ao simular a chegada do herbicida atrazine após uma aplicação diretamente na superfície da palha de cana-de-açúcar com densidade 10 t ha^{-1} , foi possível verificar que para atingir o máximo de transposição foram necessários cerca de 100 mm de chuva acumulada, enquanto que, na simulação da chegada do herbicida em aplicação diluída na água de chuva, valores próximos ao máximo foram atingidos já nos primeiros 50 mm (Figura 6).

Figura 6 – Transposição do herbicida atrazine simulando duas condições de aplicação, direta na palha e direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



Com relação à dose aplicada, a realização das lâminas de chuva de 25, 50, 75, 100 mm, após a simulação da aplicação diretamente na superfície da palha permitiram recuperar cerca de 37,7%, 53,1%, 62,8% e 69,4% do atrazine aplicado, respectivamente. Essas porcentagens com a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva foram correspondentes a 77,9%, 88,7%, 90,1% e 90,7%, respectivamente, às lâminas de chuva. Esses dados apresentam para atingir acima de 60% da assíntota foram necessárias lâminas acima de 62,8 e 88,7 mm para herbicida aplicado direto na palha diluída na água de chuva, respectivamente (Figura 6).

O atrazine apresenta baixa solubilidade em água, Kow moderado e a formulação utilizada foi em suspensão concentrada (SC) que consiste na suspensão estável do ingrediente ativo. Na lâmina acumulada de 100 mm para a simulação de aplicação em herbicida aplicado direto na palha e diluído na lâmina de chuva, foram extraídos, respectivamente, 69,4% e 90,7% do produto aplicado, demonstrando que a segunda tende a manter o ingrediente ativo suspenso na água, o que acaba facilitando a passagem do herbicida na palhada em relação à primeira.

As características físico-químicas da calda de aplicação e a intensidade de precipitação, podem influenciar na transposição pois a solubilidade e o Kow estão diretamente correlacionados com a taxa de passagem. Segundo Christoffoleti (2008) herbicidas com alta solubilidade e Kow moderado estão propensos a sofrer o processo de lixiviação.

Araldi et al. (2015) observaram que a simulação de 13 e 42 mm de chuva em palha de cana-de-açúcar 24 horas após a aplicação do atrazine na superfície da palha, ocasionou a transposição de 50% e 90% do produto em relação ao máximo extraído, respectivamente. Tofoli et al. (2002) também avaliando a transposição do atrazine em 10 t ha⁻¹ de palha de cana, concluíram que foi possível a recuperação de 92% do total aplicado com lâminas próximas a 65 mm de chuva.

4.2 Herbicida diuron

As análises de quantificação das soluções transpostas da palha de cana-de-açúcar para o herbicida diuron apresentaram diferenças significativas e interação entre os fatores estudados (Tabela 3). A comparação entre a simulação de aplicações

realizadas em aplicação direto na palha e diluída a água de chuva evidenciaram que a transposição do produto foi superior na lâmina de 25 mm de chuva, simulando a realização de irrigação ou a ocorrência de chuva, exceto para a lâmina de 100 mm.

Tabela 3 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida diuron após a simulação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 1481,28 g i.a. ha⁻¹

Lâmina Mm	Aplicação de hericidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha g i.a. ha ⁻¹
25	414,82 Bc	993,57 Aa
50	687,33 Bb	1107,88 Aa
75	883,70 Bab	1116,06 Aa
100	1013,42 Aa	1122,86 Aa
F aplicação		58,189*
F lâmina de chuva		13,01*
F aplicação x lâmina		5,53*
CV (%)		13,55

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a $p \leq 0,05$.

Esses resultados permitiram o ajuste de modelos de Mitscherlich, com alto coeficiente de determinação (R^2), sendo as estimativas dos parâmetros apresentadas na Tabela 4. O parâmetro a é a máxima transposição do produto, e a concavidade da curva (parâmetro c), foram superiores na aplicação diluída na água de chuva, indicando que seriam necessários menores volume de chuva para ocasionar a transposição do produto, em comparação à aplicação direto na palha.

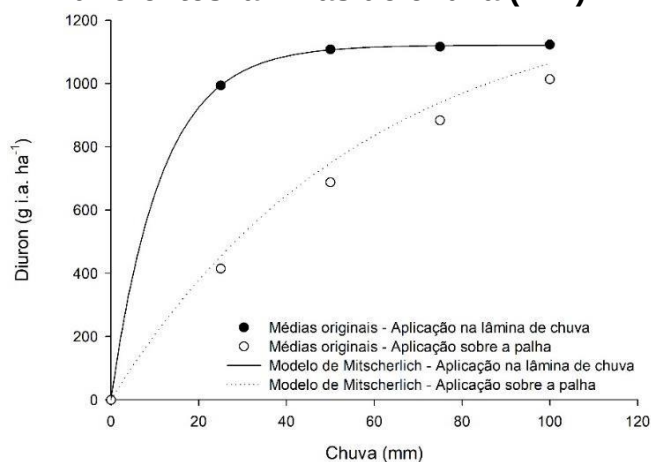
Tabela 4 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida diuron transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em dois diferentes condições de aplicação

Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	a	b	c	R^2	F
Direto na palha	1121,0000	0	0,0075	0,9999	114.4660**
Diluída na água de chuva	1292,2000	0	0,0378	1,0000	418.3580**

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

Dessa forma, é possível verificar na Figura 7, a assíntota do modelo, para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva na superfície de 10 t ha⁻¹ de palha, foi de 50 mm de chuva sendo que essa lâmina apresenta valor próximo ao máximo transposto, enquanto na simulação em aplicação direto na palha os teores transpostos continuaram aumentando, mesmo após 90 mm de chuva.

Figura 7 – transposição do herbicida diuron simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm).



O teor quantificado após 50 mm de chuva para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva, corresponde a 74,8% do quantificado na chuva de 100 mm, tendo um aumento dos volumes de chuva que não refletiu em acréscimos significativos na transposição do diuron (Figura 7).

Em função da dose aplicada do herbicida diuron foram simuladas as lâminas de chuva de 25, 50, 75, 100 mm em aplicação direto na palha, o que permitiu recuperar cerca de 28,0%, 46,4%, 50,7% e 68,4% do aplicado, respectivamente. Essas porcentagens com a simulação da chegada do produto na lâmina de chuva foram correspondentes a 67,1%, 74,8%, 75,3% e 75,8%, respectivamente (Figura 7).

Como o diuron apresenta baixa solubilidade, moderado Kow e formulação granulada dispersível (WG) que consiste na suspensão das partículas com o produto na calda e para uma solução homogênea é necessário agitação constante (ULGUIM; KRUSE, 2019). Para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva (75,8%) do herbicida transpõe a palha, demonstrando maior facilidade em relação à aplicação direto na palha (68,4%). Assim demonstra-se que o modo como o produto chega à palha pode influenciar na taxa de transposição em 10 t ha⁻¹ de palhada. O produto já suspenso no momento da aplicação tem o movimento facilitado, enquanto no outro o produto encontra-se aderido à superfície da palha, dificultando o desprendimento e o arraste das partículas do herbicida diuron.

De acordo com Matos (2018), a aplicação do herbicida diuron sobre a superfície de 10 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar, após aplicação de lâmina de 35 mm de chuva acumulada foi transposto 60%. Araldi et al. (2015) em análises 24 horas após a aplicação do herbicida diuron observaram a transposição de 90% do total extraído em

palha de cana-de-açúcar, após 23 mm de chuva, enquanto de 7 mm de chuva ocasionaram apenas 50% de transposição. Prado et al. (2013) observaram que nas precipitações inferiores a 5 mm, há um baixo nível de lixiviação do produto, enquanto para lâminas de chuva acima de 10 mm houve alta taxa de passagem do diuron em 10 t ha⁻¹ de palha para o solo.

4.3 Herbicida fomesafen

Para o herbicida fomesafen foram identificadas diferenças significativas e interação entre os fatores estudados para a quantificação da solução transposta da palha de cana-de-açúcar (Tabela 5). No entanto, essas diferenças são bem inferiores às verificadas nesse trabalho para os outros herbicidas.

Tabela 5 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida fomesafen após a simulação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 314,38 g i.a. ha⁻¹

Lâmina	Aplicação de herbicidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
Mm	g ha ⁻¹ i.a.	
25	208,77 Ab	231,78 Aa
50	254,3 Aa	251,83 Aa
75	267,63 Aa	252,60 Aa
100	275,83 Aa	252,75 Aa
F aplicação	0,371*	
F lâmina de chuva	7,68*	
F aplicação x lâmina	1,95*	
CV (%)	3,18	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a p≤0,05.

Tabela 6 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida fomesafen transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em dois diferentes condições de aplicação

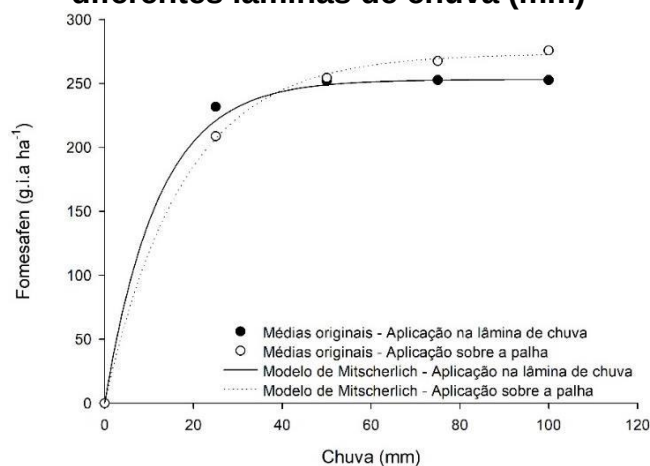
Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R ²	F
Direto na palha	273,3000	0	0,0246	0,9998	14315,300**
Diluída na água de chuva	253,0000	0	0,0359	0,9999	76068,700**

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

Ao simular a chegada do herbicida fomesafen após aplicação em aplicação direto na palha e diluída na água de chuva na superfície de 10 t ha⁻¹ de palha de cana-

de-açúcar, foi possível verificar que valores próximos ao máximo foram atingidos já nas lâminas de 75 e 50 mm de chuva acumulada, respectivamente (Figura 8).

Figura 8 – Transposição do herbicida fomesafen simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



Na Figura 8 observou-se que em função da dose aplicada de fomesafen e das lâminas de chuva de 25, 50, 75, 100 mm, foi transposto cerca de 66,4%, 80,9%, 85,1% e 87,7% do produto em simulação de aplicação em aplicação direta na palha, respectivamente. Para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva essas porcentagens foram correspondentes a 73,7%, 80,1%, 80,4% e 80,4%, respectivamente as lâminas. Esses resultados apresentam a assíntota na lâmina de 75 e 50 mm para aplicação direto na palha e diluída na água de chuva, respectivamente.

Para as duas condições de aplicação direto na palha e na lâmina de 25 mm de chuva do herbicida fomesafen na palha houve transposição acima de 80% a partir da lâmina de 50 mm. Este comportamento pode ter sido influenciado pelas características do produto, como a formulação concentrado solúvel (SL) tendo como característica uma formulação líquida que não forma precipitado e o produto dilui prontamente a água formando uma calda estável. A adição de sal promove um aumento da solubilidade do fomesafen uma vez que na formulação ácida a solubilidade é de baixa a moderada, além disso esse herbicida apresenta baixo K_{ow}. Para Christoffoleti et al. (2008) essas propriedades representam herbicidas hidrofílicos com elevado potencial de lixiviação.

Silva et al. (2014) observaram que o aumento da dose de fomesafen aplicada no sistema de plantio direto acarretou o aumento da lixiviação do produto para o solo com ocorrência de precipitação de diferentes lâminas.

A lixiviação do fomesafen da palha para o solo em diferentes profundidades é equivalente as lâminas aplicadas por meio de herbigação (3, 6 e 9 mm) e em pulverização no sistema de plantio direto quando submetido a uma lâmina de 264 mm de precipitação ou irrigação acumulado. Deste modo, quanto mais intensa a lâmina de chuva incidida na palha maior será a lixiviação do produto em camadas inferiores do solo (FONTES et al., 2004). Constatando que o sistema de plantio direto reduz o contato do fomesafen com o solo atuando como barreira física (JAKELAITIS et al., 2006).

4.4 Herbicida glyphosate

Os resultados obtidos para a quantificação de glyphosate transposto na densidade de 10 t ha⁻¹ de palha de cana, foram significativos e apresentaram interação entre os fatores estudados. Para comparação dos dois períodos simulando aplicações em aplicação direto na palha e diluída na água de chuva demonstrou acréscimo da transposição para a aplicação que o produto está diluído na água de chuva com simulação da irrigação ou a ocorrência de chuva, nas quatro lâminas estudadas (Tabela 7).

Tabela 7 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida glyphosate após a aplicação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 1207,20 g i.a. ha⁻¹

Lâmina	Aplicação de herbicidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
Mm	g i.a. ha ⁻¹	
25	434,41 Bc	690,04 Ab
50	520,91 Bb	746,62 Aa
75	558,56 Bab	752,96 Aa
100	579,9 Ba	756,15 Aa
F aplicação	650,32*	
F lâmina de chuva	32,1*	
F aplicação x lâmina	4,4*	
CV (%)	3,75	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a p≤0,05.

O ajuste dos dados obtidos no estudo pelo modelo não-linear de Mitscherlich, apresentou alto coeficiente de determinação (R^2), sendo as estimativas dos parâmetros apresentadas na Tabela 8. A assíntota do modelo, determinada pelo parâmetro a estima a transposição máxima e a concavidade da curva definida pelo parâmetro c corresponde a capacidade de recuperar a maior taxa do herbicida aplicado em menor volume de chuva.

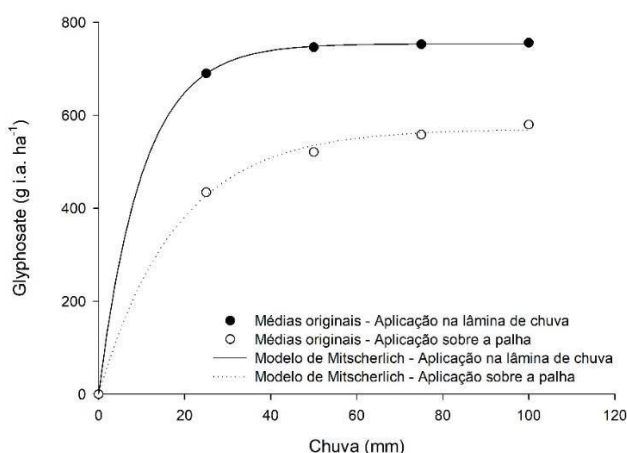
Tabela 8 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida glyphosate transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha^{-1}), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	a	b	c	R^2	F
Direto na palha	571,0000	0	0,0240	0,9996	4361,6600**
Diluída na água de chuva	754,0000	0	0,0428	0,9999	36851400**

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

Os resultados indicaram que ao simular a chegada do herbicida glyphosate na superfície da palha em aplicação direta na palha e diluída na água de chuva, observou-se que os valores próximos ao máximo atingidos foram alcançados respectivamente nas lâminas de 70 e 40 mm chuva correspondendo a 46,31% e 61,2% do total aplicado (Figura 9).

Figura 9 – Transposição do herbicida glyphosate simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



Com relação à dose aplicada do herbicida, e após as lâminas de chuva de 25, 50, 75, 100 mm, foi realizada a simulação da aplicação em aplicação direto na palha observando transposições com cerca de 36,0 43,1%, 46,3% e 48,0% do glyphosate aplicado, respectivamente. Para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva essas porcentagens foram correspondentes a 57,2%, 61,8%, 62,4% e 62,6%, respectivamente as lâminas. Esses dados apresentaram comportamento assintótico a partir da lâmina de 70 mm para aplicação direto na palha e 40 mm na aplicação com a diluição do produto na água de chuva.

Para Aslam et al. (2018) o comportamento do glyphosate em cobertura de milho em precipitações com alta intensidade e pouco frequente e, com leve intensidade e alta frequência, um dia após aplicação foi recuperado 57% e 45% do glyphosate da cobertura morta nas respectivas intensidade, porém ainda permanece na cobertura 43% e 55% em ambas intensidades de chuva.

O herbicida glyphosate é altamente solúvel, tem baixo Kow e sua formulação consiste na suspensão estável do produto após sua diluição na calda de aplicação. Essas características podem auxiliar na intensidade de transposição do herbicida em aplicações direto na palha e na lâmina de chuva na densidade de 10 t ha⁻¹ de palhada de cana em diferentes aplicações e lâminas de chuva.

4.5 Herbicida Haloxyfop-p-methyl

Na tabela 9, observa-se os resultados da análise estatística de quantificação do herbicida haloxyfop-p-methyl transposto em 10 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar, em diferentes lâminas de chuva e simulando duas condições de aplicação apresentaram diferenças significativas e interação entre os fatores estudados. Deste modo, quando comparamos as aplicações simulando a chegada do produto na lâmina de chuva e direto na palha observamos valores elevados de transposição para produto diluído na água de chuva e/ou irrigação nas lâminas empregadas.

Foram apresentadas na tabela 10, as estimativas dos parâmetros dos dados ajustados para o modelo não-linear de Mitscherlich, com elevado coeficiente de determinação (R^2) para a duas diferentes condições de aplicação. A assíntota representada pelo parâmetro a corresponde a estimativa do máximo transposto e a concavidade da curva corresponde ao parâmetro c que se refere a capacidade de extração do haloxyfop-p-methyl em menor lâmina de chuva.

Tabela 9 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida haloxyfop-p-methyl após a aplicação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação Dose aplicada: 75,45 g i.a. ha⁻¹

Lâmina	Aplicação de herbicidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
Mm	g i.a. ha ⁻¹	
25	9,71 Ba	32,70 Aa
50	11,79 Ba	33,92 Aa
75	12,77 Ba	33,92 Aa
100	13,28 Ba	33,92 Aa
F aplicação	323,6*	
F lâmina de chuva	0,79*	
F aplicação x lâmina	0,19*	
CV (%)	15,01	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a $p \leq 0,05$.

Tabela 10 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida haloxyfop-p-methyl transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

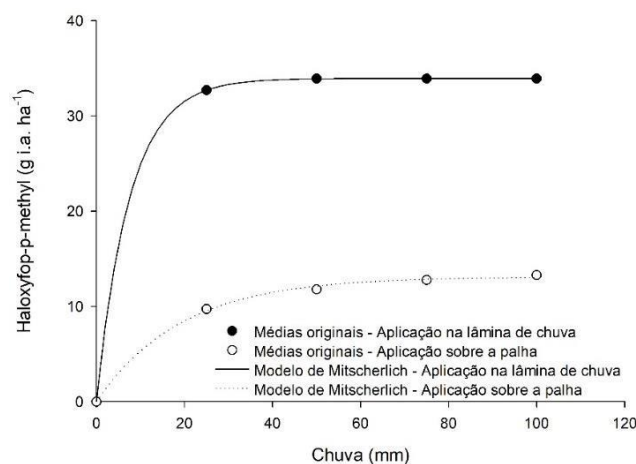
Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R ²	F
Direto na palha	13,1001	0	0,0226	0,9996	4063,9500**
Atrás da chuva na palha	33,9363	0	0,0575	1,0000	508393200**

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

Após simular a chegada do herbicida haloxyfop-p-methyl em aplicação realizada diretamente na superfície da palha com o valor máximo transposto foi em cerca de 100 mm de chuva acumulada, enquanto na simulação da chegada do produto na lâmina de chuva, valores próximos ao máximo foram atingidos na lâmina de 25 mm (Figura 10).

A transposição do haloxyfop-p-methyl em 10 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar após o emprego das lâminas de chuva de 25, 50, 75, 100 mm, a simulação de aplicação direto na palha permiti recuperar cerca de 13%, 16%, 17% e 18% do produto aplicado, respectivamente. Para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva essas porcentagens foram correspondentes a 43,3%, 45%, 45% e 45%, respectivamente. As precipitações que melhor representam a assíntota máxima do herbicida haloxyfop-p-methyl são as lâminas de 40 e 25 mm das aplicações realizadas direto na palha e diluída na água de chuva respectivamente (Figura 10).

Figura 10 – Transposição do herbicida haloxyfop-p-methyl simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



O herbicida haloxyfop-p-methyl, nas aplicações de direto na palha e diluída na água de chuva teve retenção superiores a 80% e 50% do produto na palha mesmo na lâmina de 100 mm. Tal comportamento pode ser explicado pelas características do herbicida em ter baixa solubilidade, alto Kow o qual dificulta no processo de lixiviação. Para Miguela; Cunha (2010) Herbicidas de formulação concentrado emulsionável (EC) precisa ser diluído em água, na qual o ingrediente ativo é incorporado a um solvente apropriado, pois esta solução é imiscível em água, deste modo faz necessário o emprego de algum adjuvante.

De acordo com Silva (2014) o herbicida haloxyfop-p-methyl quando aplicado na superfície da folha pode ser lavado a partir do intervalo de chuva e aumento da intensidade. À medida que se distancia a ocorrência de chuva, aumenta relativamente a aderência e/ou absorção do herbicida na superfície da folha.

4.6 Herbicida hexazinone

Os dados obtidos da transposição do herbicida hexazinone simulando a aplicação direto na palha e a chegada do produto na lâmina de chuva com diferentes lâminas de chuva apresentam diferenças significativas e interação entre os fatores estudados. A aplicação direto na palha apresenta maior transposição em lâmina de chuva de 100 mm, em contra partida para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva a realização de irrigação ou precipitação a partir de 25 mm tem-

se valores próximos ao máximo extraído (Tabela 11).

Tabela 11 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida hexazinone após a aplicação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 415,98 g i.a. ha⁻¹

Lâmina Mm	Aplicação de herbicidas g i.a. ha ⁻¹	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
25	215,60 Bb	304,08 Aa
50	255,65 Bab	338,72 Aa
75	275,67 Bab	343,46 Aa
100	285,03 Ba	346,53 Aa
F aplicação	45,25*	
F lâmina de chuva	5,02*	
F aplicação x lâmina	0,32*	
CV (%)	10,7	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a $p \leq 0,05$.

Os resultados obtidos nas análises de quantificação do hexazinone das soluções transposta da palha de cana -de-açúcar, simulando aplicações Direto na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, permitiram o ajuste de modelos de Mitscherlich, com alto coeficiente de determinação (R^2), em relação aos demais parâmetros apresentados na Tabela 12, a assíntota do modelo (a) estima a transposição máxima do produto e a concavidade da curva (c) representa amplitude da quantidade transposta em função da chuva.

Tabela 12 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida hexazinone transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

Aplicação	Estimativa dos parâmetros			
	a	b	c	R^2
Direto na palha	280,5000	0	0,0244	0,9995
Diluída na água de chuva	344,9000	0	0,0370	0,9999

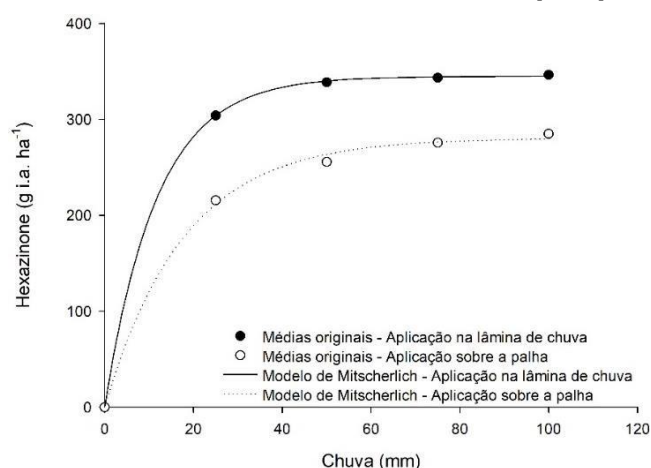
** Significativo pelo teste de F, a 1% de probabilidade.

Ao simular a chegada do herbicida hexazinone após uma aplicação direta na palha e a chegada na do produto na lâmina de chuva na superfície da palha, foi possível verificar que para atingir valores próximos ao máximo transposto foram necessários cerca de 62 e 44 mm de chuva, respectivamente (Figura 11). Esses dados

apresentaram comportamento assintótico a partir da lâmina de 50 mm para ambas as épocas de aplicação.

Com relação à dose aplicada do produto, a realização das quatro lâminas de chuva crescentes, após a simulação da aplicação direta na palha permitiram recuperar cerca de 52%, 62%, 66,4% e 69% do hexazinone aplicado, respectivamente. Para a aplicação simulando a chegada do produto pela lâmina de chuva na palhada correspondentes a 73,3%, 82%, 83% e 84%.

Figura 11 – Transposição do herbicida hexazinone simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



Em contra partida Araldi et al. (2015) observaram que a lixiviação do herbicida hexazinone em 10 t ha⁻¹ de palha de cana foi necessária uma lâmina de 5 mm para obter 50% de passagem em relação ao máximo extraído. Além disso, na chuva de 18 mm transpôs 90% do hexazinone. Para obter os mesmos valores de 50% e 90% de transposição, foi necessário lâminas de 24 mm e acima de 100mm de chuva concomitantemente para a aplicação direta na palha.

Como mencionado anteriormente os herbicidas que apresentam formulação de concentração solúvel (SL) demonstram uma suspensão estável na calda de aplicação. O produto hexazinone é também altamente solúvel e tem baixo Kow. Essas características podem auxiliar na intensidade de transposição, quando aplicado em 10 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar em aplicações direta na palha e diluído a água de chuva com precipitações acumulada de 100 mm.

Tonieto e Regitano (2014) avaliaram o potencial de lixiviação do herbicida hexazinone em diferentes graus de decomposição de palha e constatou que os diferentes graus de decomposição afetam o potencial de movimentação do herbicida. Na presença de palha, na lâmina simulada de 100 mm de chuva aproximadamente 5% de hexazinone foram lixiviados.

O hexazinone aplicado em palha com diferentes graus de decomposição apresentou em média 78% do valor aplicado ficou retido, essa alta retenção na palha parece estar relacionada ao fenômeno de aprisionamento físico, já que todos os tipos de palha testadas e seus diferentes graus de decomposição apresentam elevada capacidade de retenção de água, sendo suficiente para diminuir a taxa de passagem do hexazinone (TONIETO e REGITANO, 2014). De acordo com o mesmo autor, a palha apresenta uma característica muito importante que é a presença de macroporos que favorece o fluxo preferencial de água, deste modo, o herbicida pode ficar retido em diversos pontos da palha mesmo quando há um único canal de fluxo hídrico.

4.7 Herbicida indaziflam

Simulando a aplicação direta na palha e a chegada na primeira lâmina de chuva do herbicida indaziflam em 10 t ha^{-1} de palha de cana-de-açúcar, os resultados atingidos nas análises de quantificação das soluções transpostas, tiveram diferenças significativas e interação entre os fatores estudados (Tabela 13). A transposição do produto nas simulações de aplicações obteve valores superiores para o indaziflam aplicado simulando a chegada do produto na lâmina de chuva equivalentes a 51%, 49%, 45% e 40% quando comparados a aplicação direto na palha para as lâminas na ordem crescente, respectivamente.

Os resultados obtidos permitiram o ajuste de modelos de Mitscherlich, com alto coeficiente de determinação (R^2), sendo as estimativas dos parâmetros apresentadas na Tabela 14. O parâmetro a representa a assíntota do modelo, que determina a transposição máxima do produto aplicado e, a concavidade da curva expressa o parâmetro c que representa a taxa da recuperação do produto sendo maior para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva, representando uma

maior transposição em menor volume de chuva comparada com o aplicado direto na palha.

Tabela 13 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida indaziflam após a aplicação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 94,31 g i.a. ha⁻¹

Lâmina Mm	Aplicação de herbicidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
	g i.a. ha ⁻¹	
25	15,09 Bb	63,51 Aa
50	24,58 Bab	71,04 Aa
75	30,80 Bab	73,32 Aa
100	36,56 Ba	74,33 Aa
F aplicação	175,38*	
F lâmina de chuva	4,45*	
F aplicação x lâmina	0,51*	
CV (%)	19,22	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a $p \leq 0,05$.

Tabela 14 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida indaziflam transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

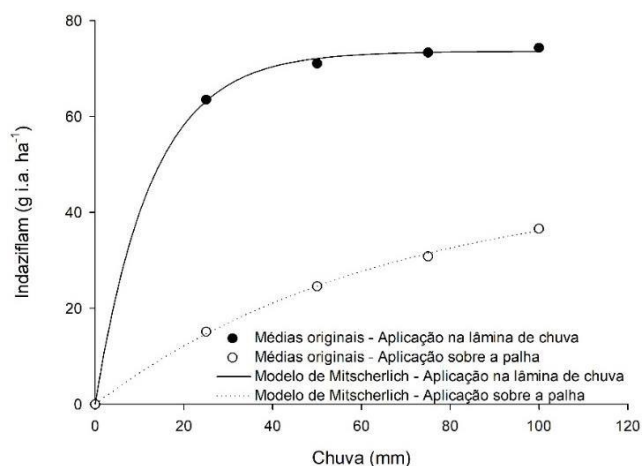
Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	a	b	c	R ²	F
Direto na palha	46,1866	0	0,0066	0,9997	5564,9200**
Diluída na água de chuva	73,5462	0	0,0341	0,9999	16152,4000**

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

Na chegada do herbicida indaziflam em 10 t ha⁻¹ de palha ao simular uma aplicação, os resultados indicaram que o acúmulo de 100 mm de chuva foi suficiente para transpor o máximo de produto retido, ao mesmo tempo que na simulação da chegada do produto na lâmina de chuva, valores próximos ao máximo foram atingidos já nos primeiros 40 mm (Figura 12).

Lâminas de chuva empregadas de 25, 50, 75, 100 mm, após a simulação da aplicação direta na palha transpôs cerca de 16%, 18,4%, 28% e 34,4% do indaziflam aplicado, respectivamente. Essas porcentagens com a simulação na lâmina de 25 mm de chuva foram correspondentes a 67%, 75%, 78% e 79%. Esses dados apresentaram assíntota a partir da lâmina de 80 e 50 mm para aplicação direto na palha e na lâmina de chuva, respectivamente.

Figura 12 – Transposição do herbicida indaziflam simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



Este herbicida apresenta baixa solubilidade em água, Kow moderado e uma formulação suspensão concentrada (SC) que consiste na suspensão estável do ingrediente ativo. Essas características, juntamente com as simulações de aplicação pode auxiliar na transposição do indaziflam. Segundo Christofletti et al. (2008), os herbicidas com menor retenção sobre a palha são os que apresentam maior solubilidade e menor Kow. Segundo Kawamoto e Urano (1989), quanto menor a solubilidade em água do herbicida maior será a afinidade da molécula pela matéria orgânica, a qual é o principal sítio de sorção de herbicidas pouco solúveis em água devido à sua alta CTC e característica lipofílica. Para Guerra et al. (2015) o indaziflam necessita de irrigação diária ou precipitação de pelo menos 20 mm logo após a aplicação na superfície da palha é essencial para a eficiência do herbicida.

O herbicida indaziflam aplicado em diferentes densidades de palha não influenciam na taxa de transposição de 88% do total aplicado do produto para o solo mesmo com lâminas crescentes de chuva, porém, o máximo extraído foi observado em lâminas superiores a 80 mm (CARBONARI, 2017).

A densidade de palhada em 10 t ha⁻¹ um dia após aplicação é suficiente para extrair 90% do indaziflam em 100 mm de chuva (CARBONARI, 2017).

Guerra et al. (2015) observaram que mesmo com baixa solubilidade, o indaziflam após a aplicação foi transposto da palha para a superfície do solo em 20 mm de chuva, sendo suficiente para o controle de ervas daninhas.

4.8 Herbicida S-metolachlor

Os resultados obtidos por S-metolachlor nas análises de quantificação das soluções transpostas da palha apresentaram diferenças significativas e interação entre os fatores analisados (Tabela 15). A comparação entre a simulação de aplicações realizadas direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva evidenciaram que a transposição do produto foi superior quando realizada em na lâmina de 25 mm de chuva, simulando a realização de irrigação ou a ocorrência de chuva nas quatro lâminas de chuva estudadas.

Os resultados apresentados para o S-metolachlor permitiram o ajuste de modelos de Mitscherlich, com alto coeficiente de determinação (R^2), sendo as estimativas dos parâmetros apresentadas na Tabela 16. A assíntota do modelo, determinada pelo parâmetro a estima a transposição máxima e a concavidade da curva c a intensidade de transposição do produto em relação a chuva empregada.

Tabela 15 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicida S-metolachlor após a aplicação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 1810,80 g i.a. ha⁻¹

Lâmina mm	Aplicação de herbicidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
	g i.a. ha ⁻¹	
25	273,56 Bb	432,05 Aa
50	340,82 Bab	480,43 Aa
75	370,20 Ba	485,90 Aa
100	391,69 Ba	489,50 Aa
F aplicação	93,55*	
F lâmina de chuva	8,61*	
F aplicação * lâmina	1,01*	
CV (%)	9,17	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a $p \leq 0,05$.

Tabela 16 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida S-metolachlor transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

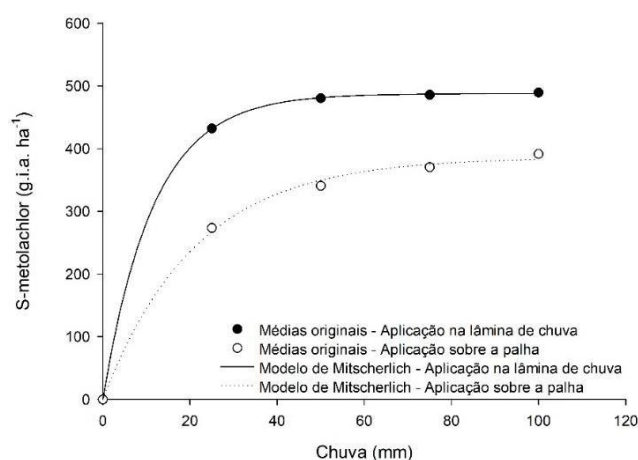
Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	a	b	c	R^2	F
Direto na palha	386,2000	0	0,0205	1,0000	3303,8400**
Diluída na água de chuva	487,8000	0	0,0376	0,99999	24287700**

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

O S-metolachlor após aplicação direta na superfície de 10 t ha⁻¹ de palha, foi possível verificar que, para atingir o máximo de transposição são necessários cerca de 100 mm de chuva acumulada, enquanto que, com aplicação diluída na água de chuva, valores próximos ao máximo extraído foram atingidos nos primeiros 50 mm (Figura 13).

Em relação à dose utilizada, foi realizada as lâminas de chuva de 25, 50, 75 e 100 mm, após a simulação da aplicação direto na palha transpondo em torno de 15%, 19%, 20,4% e 22% do S-metolachlor, respectivamente. Essas porcentagens em aplicação diluída na água de chuva foram correspondentes a 24%, 27%, 27% e 27%, respectivamente as lâminas. A lâmina de 100 mm para as duas formas de aplicação resultou em retenção de aproximadamente 78% e 73% do produto.

Figura 13 – Transposição do herbicida S-metolachlor simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



A transposição do S-metolachlor para as lâminas de chuvas crescentes apresentou a assíntota nas lâminas de 60 mm em aplicação direto na palha e 40 mm em aplicação diluída na água de chuva.

Tal comportamento pode ser influenciado pelas propriedades físico-químicas, como, a baixa solubilidade, o alto Kow e a formulação concentrado emulsionável (EC) que consiste ao produto uma característica de diluição completa na água. Essas propriedades podem auxiliar na transposição do herbicida S-metolachlor as 10 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar na simulação das aplicações direto na palha na lâmina de 25 mm de chuva em diferentes intensidades de lâminas de chuva empregadas.

Estudo realizado por Banks e Robinson (1986), avaliando diferentes efeitos da palha sobre a atividade do herbicida S-metolachlor, observaram que, tanto a atividade quanto a persistência destes herbicidas variaram com o incremento do conteúdo de palha sobre a superfície do solo. Lamoreaux et. al. (1993), avaliaram a eficiência do S-metolachlor em coberturas de soja, milho e aveia em quantidades situadas em 1,12 a 8,96 t ha⁻¹, após a lâmina de irrigação de 1,6 a 12,8 mm o herbicida S-metolachlor foi lixiviado, mais na cobertura de soja e para a aveia menos. De acordo com os dados apresentados por esses pesquisadores indica que as características morfológicas e capacidade de adsorção da palhada influencia na transposição e na eficácia do herbicida.

4.9 Herbicida sulfentrazone

Para as duas aplicações do produto direto na palha e diluído a água de chuva em 10 t ha⁻¹ de palhada de cana-de-açúcar nas diferentes lâminas empregadas observou diferença estática e interação entre os fatores analisados. Comparando as aplicações observou-se que a transposição do sulfentrazone foi superior quando realizada aplicação do produto diluído a água de chuva, simulando a realização de irrigação ou a ocorrência de chuva, nas lâminas crescente de chuva estudadas (Tabela 17).

Tabela 17 – Resultado da análise estatística para a transposição do herbicidas sulfentrazone após a aplicação de diferentes lâminas de chuva, em duas condições de aplicação. Dose aplicada: 754,50 g i.a. ha⁻¹

Lâmina mm	Aplicação de herbicidas	
	Direto na palha	Atrás da chuva na palha
	g i.a. ha ⁻¹	
25	302,19 Bc	662,80 Ab
50	456,42 Bb	729,07 Aa
75	523,42 Ba	738,65 Aa
100	558,85 Ba	744,17 Aa
F aplicação	604,93*	
F lâmina de chuva	51,41*	
F aplicação * lâmina	13,47*	
CV (%)	5,04	

- Letra minúscula na coluna e maiúscula na linha diferenciam entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

* Significativo a p≤0,05.

O ajuste de modelos de Mitscherlich, apresentados para esses resultados permitiram, um alto coeficiente de determinação (R^2), uma transposição máxima correspondendo a assíntota do modelo, determinada pelo parâmetro a e uma maior transposição em menor volume de chuva, comparada com a aplicação direto na palha quando comparada com a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva estimando na concavidade da curva do parâmetro c (Tabela 18).

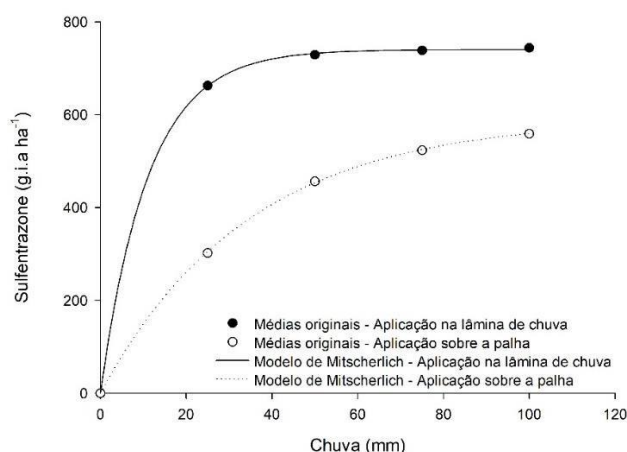
Tabela 18 – Estimativa dos parâmetros do modelo de regressão não-linear de Mitscherlich ajustado em função do teor do herbicida sulfentrazone transposto da palha de cana-de-açúcar (10 t ha⁻¹), após a simulação de lâminas de chuva acumulada (mm), em duas diferentes condições de aplicação

Aplicação	Estimativa dos parâmetros				
	a	b	c	R^2	F
Direto na palha	592,3000	0	0,0126	1,0000	60606,0000**
Atrás da chuva na palha	740,6000	0	0,0390	1,0000	122413,0000**

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

Após simular a chegada do herbicida sulfentrazone pela aplicação direto na palha, na superfície de 10 t ha⁻¹ de palha, foi possível verificar que para atingir o máximo de transposição foram necessários cerca de 100 mm de chuva acumulada, enquanto que, na simulação da chegada do produto diluído em água de chuva, valores próximos ao máximo foram atingidos já nos primeiros 40 mm (Figura 14).

Figura 14 – Transposição do herbicida sulfentrazone simulando duas condições de aplicação, direta na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, após realização de diferentes lâminas de chuva (mm)



Com relação à dose aplicada de sulfentrazone e a realização das lâminas de chuva de 25, 50, 75, 100 mm após a aplicação direto na palha, permitiram recuperar cerca de 40%, 61%, 69,4% e 74% do aplicado, respectivamente. Essas porcentagens com a simulação da chegada do produto diluído em água de chuva foram correspondentes a 88%, 97%, 98% e 99%. Esses dados atingiram a assíntota na lâmina de 86 e 38 mm para aplicação direto na palha e na lâmina de 25 mm de chuva, respectivamente (Figura 14).

As características que podem influenciar no comportamento do sulfentrazone na palhada estão, a alta solubilidade, o baixo Kow e a formulação WG – granulado dispersível, para que haja uma solução homogeneia é necessário à agitação constante das partículas e que possam se manter suspensas por mais tempo no momento da aplicação, facilitando o transporte das partículas na aplicação em lâmina de chuva uma vez que as partículas do herbicida estarão suspensas na calda. Porém, na aplicação direta na superfície da palha até que ocorra o desprendimento e o arraste das partículas sendo necessárias maiores lâminas de chuva, uma vez que, o impacto da gota de chuva na palha é quase inexistente.

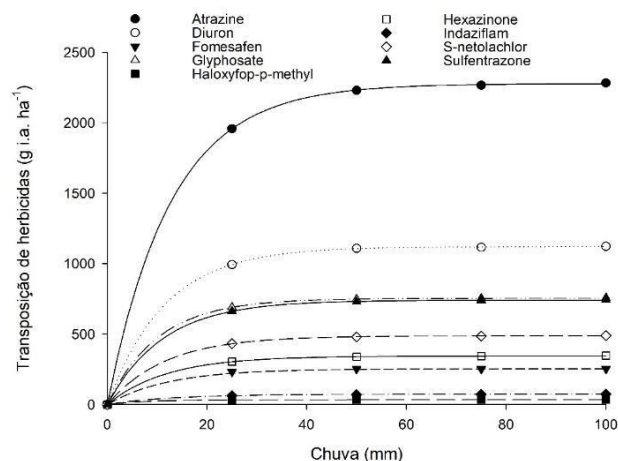
Para Carbonari et al. (2016) a lâmina de chuva de 20 mm promoveu a liberação máxima de sulfentrazone em relação a porcentagem do produto aplicado, independentemente da quantidade de resíduos avaliado. Deste modo, na palhada de 5 e 20 t ha⁻¹ com lâmina simulada de 20 mm foi observado uma transposição de aproximadamente 77% e 64%, respectivamente.

Para Simone et al. (2006) a intensidade de 20 mm foi suficiente para que o herbicida sulfentrazone atingisse o solo mesmo na quantidade de 20 t ha⁻¹ de palha de cana, porém, na irrigação inferior a 10 mm não foi suficiente para transpor o herbicida na mesma quantidade de palha.

De acordo com Matos (2018), a aplicação de 35 mm de chuva, transpôs 96,63% do herbicida sulfentrazone na superfície de 10 t ha⁻¹ de palha de cana-de-açúcar.

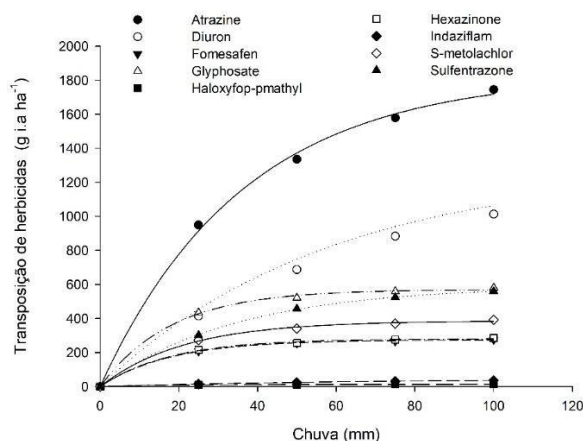
Os herbicidas aplicados simulando a chegada do produto na lâmina de chuva em 10 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar na chuva de 100 mm apresentaram a seguinte ordem decrescente de transposição em relação ao total aplicado: sulfentrazone, atrazine, diuron, hexazinone, fomesafen, indaziflam, glyphosate, haloxyfop-p-methyl e S-metolachlor correspondendo a 99%, 91%, 91%, 84%, 80,4%, 79%, 63%, 45% e 27%, respectivamente (Figura 15).

Figura 15 –Transposição de herbicidas aplicados simulando a chegada do produto na primeira lâmina de chuva, em seguida foram realizadas diferentes lâminas chuvas



Para aplicação direto na palha a transposição em relação ao total aplicado apresentou a seguinte ordem decrescente: 88%, 74%, 69,4%, 69%, 68,4%, 48%, 34,4%, 22% e 18% para os herbicidas fomesafen, sulfentrazone, atrazine, hexazinone, diuron, glyphosate, indaziflam, S-metolachlor e haloxyfop-p-methyl, respectivamente (Figura 16). Contudo, os herbicidas atrazine e diuron tendem a aumentar sua transposição mesmo com 100 mm de chuva, porém, os demais produtos a lâmina de 50 mm foram suficientes para manter equivalente com o máximo transposto com 100 mm de chuva.

Figura16 –Transposição de herbicidas aplicados direto na palha, em seguida simulou diferentes lâminas chuvas



Os herbicidas haloxyfop-p-methyl e indaziflam quando aplicados diluídos em água de chuva apresentaram transposição superior em 60,86% e 56,31%, respectivamente, à aplicação direta na palha, após o acúmulo de 100 mm de chuva (Tabela 19). Esse comportamento pode estar relacionado à formulação utilizada e à baixa solubilidade das moléculas em água, o que influencia na transposição dos herbicidas nas condições avaliadas.

Para os herbicidas sulfentrazone, atrazine, glyphosate, S-metolachlor e hexazinone, quando aplicados diluídos em água de chuva, observou-se transposição superior de 24,90%, 23,56%, 23,31%, 19,98% e 17,75%, respectivamente, em relação à aplicação direta na palha, ao acumular 100 mm de chuva. Para o diuron o comportamento verificado foi inferior esses, apresentando superioridade de 9,78%. Esse comportamento pode estar relacionado à formulação utilizada e à solubilidade das moléculas em água podendo variar em alta e baixa, porém o Koc pode variar de moderadamente móvel a móvel o que influencia na transposição dos herbicidas nas condições avaliadas (Tabela 19).

Contudo, o herbicida fomesafen quando aplicado direto na palha apresenta transposição superior em 9,13% à aplicação do produto diluído em água de chuva, na lâmina de 100 mm de chuva. Esse comportamento pode estar relacionado à formulação utilizada, o Koc móvel e à alta solubilidade da molécula em água, o que influencia na transposição dos herbicidas nas condições avaliadas.

Tabela 19 – Comparação do comportamento dos herbicidas aplicados direto na palha em relação ao aplicado na lâmina de 25 mm de chuva, após a realização de chuva de 100 mm acumulada

Herbicidas	Aplicação palha – chuva (%)
Haloxyfop-p-methyl	60,86
Indaziflam	56,31
Sulfentrazone	24,90
Atrazine	23,56
Glyphosate	23,31
S-metolachlor	19,98
Hexazinone	17,75
Diuron	9,78
Fomesafen	9,13

Para Lavoretti et al. (2003) a concentração do herbicida e a distância na qual é transposto são influenciadas por fatores como, período de aplicação, taxa de aplicação, tipo de cobertura, intensidade de irrigação ou precipitação versus a taxa de infiltração, e propriedades físico-químicas do produto e do solo.

A dinâmica dos herbicidas estudados foi diretamente influenciada pela maneira em que alcançaram a palha. Quando a aplicação direto na palha bem como a chegada do herbicida pela água da chuva, ao atingir a superfície da palha, o produto pode ser transposto de acordo com a intensidade da precipitação. Lâmina de chuva maiores são necessárias para a aplicação direta na palha, pois a aplicação é feita diretamente na palha, que pode reter o herbicida na superfície e nos macroporos, dificultando a sua transposição. Para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva houve elevada transposição mesmo em baixa intensidade de precipitação.

A nova metodologia desenvolvida distingue-se das convencionalmente utilizadas neste tipo de estudo por ser altamente precisa na aplicação de doses dos herbicidas, pela aplicação volumétrica da água nas chuvas simuladas e pelo controle da taxa de aplicação da água, mas tem como limitação a baixa existência de impacto das gotas sobre a palha, sendo mínima a inserção de energia cinética no sistema, o que aparentemente comprometeu o transporte de herbicidas que não formam soluções verdadeiras em água (exemplo: indaziflam).

5 CONCLUSÕES

O método mostrou-se eficaz para o estudo de transposição de herbicidas em palhada de cana-de-açúcar para as duas condições testadas sendo pela aplicação diretamente sobre a palha ou na lâmina de chuva simulando o herbicida que é carregado diretamente das plantas para a palha.

A aplicação simulando a chegada dos herbicidas na lâmina de 25 mm de chuva em 10 t há⁻¹ de palha de cana-de-açúcar ocasionou melhores resultados na transposição das demais lâminas empregadas.

Para a aplicação simulando a chegada do produto na lâmina de chuva em 10 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar na chuva de 100 mm apresentaram a seguinte ordem decrescente de transposição: sulfentrazone, atrazine, diuron, hexazinone, fomesafen, indaziflam, glyphosate, haloxyfop-p-methyl e S-metolachlor.

Na aplicação direto na palha com lâmina de 100 mm de chuva houve transposição na ordem decrescente dos produtos: fomesafen, sulfentrazone, atrazine, hexazinone, diuron, glyphosate, indaziflam, S-metolachlor e haloxyfop-p-methyl.

Os resultados obtidos neste experimento com relação ao transporte de herbicidas aplicados sobre a palha, pela água de chuva, precisam ser considerados com cuidado e sempre comparados com os resultados obtidos com metodologias convencionais em que há o impacto das gotas de chuva com a palha.

REFERÊNCIAS

- ANDERSON, M. D.; ARNOLD, W. E. Weed control in sunflowers (*Helianthus annuus*) with desmediphan and phenmediphan. **Weed Science**, Champaign, v. 32, p. 310-314, 1984.
- ARALDI, R. et al. Performace of herbicides in sugarcane straw. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 45, n. 12, p. 2106-2112, 2015.
- AZANIA, C. A. M. et al. Seletividade de herbicidas. II – Aplicação de herbicidas em pós-emergência inicial e tardia da cana-de-açúcar na época das chuvas. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 23, n. 4, p. 669-675, 2005.
- AZANIA, C. A. M. et al. Seletividade de herbicidas. III – aplicação de herbicidas em pós-emergência inicial e tardia da cana-de-açúcar na época da estiagem. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 24, n. 3, p. 489-495, 2006.
- ASLAM, S. et al. Mulch of plant residues at the soil surface impact the leaching and persistence of pesticides: a modelling study from soil columns. **Journal of Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 214, p. 54-64, 2018.
- BANKS, P. A.; ROBINSON, E. L. Soil reception and activity of acetochlor, alachlor and metolachlor as affected by wheat (*Triticum aestivum*) straw irrigation. **Weed Science**, Champaign, v. 34, p. 607-611, 1986.
- BRASIL. Decreto n. 11.241, de 20 de setembro de 2002. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. **Diário Oficial da União**, São Paulo, v. 112, n. 180, 20 set. 2002. Seção 1.
- CARBONARI, C. A. **Dinâmica e degradação em palha e solo e eficácia dos herbicidas indaziflam, isoxaflutole e metribuzin no controle de plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar**. 2017.197 p. Tese (Livre-docente em Matologia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017.
- CARBONARI, C. A. et al. Dynamics of sulfentrazone in sugarcane straw. **Weed Science**, Champaign, v. 64, n. 1, p. 201-206, 2016.
- CARBONARI, C. A. et al. Eficácia da associação entre os herbicidas clomazone e hexazinona no controle de plantas daninhas em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Londrina, v. 1, p. 17-25, 2010.
- CAVENAGHI, A. L. et al. Dinâmica do herbicida amicarbazone (dinamic) aplicado sobre palha de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*). **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 25, n. 4, p. 831-837, 2007.
- CHEONG, L. R. N.; TEELUCK, M. The practice of green cane trash blanketing in the irrigated zone of Mauritius: effects on soil moisture and water use efficiency of sugar cane. **Sugar Tech**, New Delhi, v. 18, p. 124-133, 2016.
- CHRISTOFFOLETI, P. J. et al. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP2, 2008. 90 p.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**: primeiro levantamento – maio 2019. Brasília-DF: Conab, v. 6, n. 1, 58 p.

CONCENÇO, G.; LEME FILHO, J. R. A.; SILVA, C. J. **O aleiramento do palhiço de cana-de-açúcar agrava a infestação de plantas daninhas**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2017. (Comunicado técnico 229).

CONFESSOR, J. G. **Avaliação de processos erosivos hídricos em diferentes usos agrícolas, utilizando simulador de chuvas no ambiente de cerrado**. 2019.187 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto De Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

CORREIA, N. M.; DURUGAN, J. C. Emergência de plantas daninhas em solo coberto com palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 22, n. 1, p. 11-17, 2004.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 20 abr. 2019.

FONTES, J. R. A. *et al.* Lixiviação de herbicidas no solo aplicados com água de irrigação em plantio direto. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 22, n. 4, p. 623-631, 2004.

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

FRANCONERE, R. **Mercado de herbicidas na cultura da cana-de-açúcar**. 54 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Economia) – Escola de Economia de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GUERRA, N. *et al.* Influence of precipitation and sugarcane straw in aminocyclopyrachlor and indaziflam control efficiency. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 33, n. 3, p. 535-542, 2015.

GUIMARÃES, G. L. Impactos ecológicos do uso de herbicidas ao meio ambiente. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 4, n. 12, p. 159-180, 1987.

JAKELAITIS, A. *et al.* Atividade residual no solo da mistura comercial dos herbicidas fluazifop-p-butil e fomesafen utilizados no cultivo convencional e direto do feijoeiro. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 24, n. 3, p. 533-540, 2006.

KAWAMOTO, K.; URANO, K. Parameters for predicting fate of organochlorine pesticides in the environment (II) adsorption constant to soil. **Chemosphere**, Oxford, v. 19, p. 1223-1231, 1989.

LAMOREAUX, R. J.; JAIN, R.; HESS, F. D. Efficacy of dimethenamid, metolachlor and encapsulated alachlor in soil covered with crop residue. Brighton Crop Protection Conference, **Weeds**, Ithaca, v. 3, n. 3, p. 1015-1020, 1993.

LAVORENTI, A.; PRATA, F.; REGITANO, J. B. Comportamento de pesticidas em solos fundamentais. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 3, p. 291-334, 2003.

MARÍN, G. *et al.* Development of a short acculturation scale for Hispanics. **Hispanic Journal of Behavioral Sciences**, Thousand Oaks, v. 9, p. 183-205, 1987.

MATOS, A. K. A. **Influência da vinhaça e da palha de cana-de-açúcar na sorção de herbicidas aplicados em diferentes solos**. 2014. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2014.

MATOS, A. K. A. **Uniformidade na deposição e dinâmica de formulações de diuron e sulfentrazone em solo, palha e plantas de cana-de-açúcar**. 2018. 101 p. Tese (Doutor em Agronomia/Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

MATOS, A. K. A. *et al.* Dynamics of preemergent herbicides in production systems with straw. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Brasília-DF, v. 15, n. 1, p. 97-106, 2016.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Interrill runoff and erosion: effects of row-sideslope shape, rain energy, and rain intensity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 35, n. 4, p. 1199-1203, 1979.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de reconhecimento do palhicho na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 546-552, 2008.

MIGUELA, J. V.; CUNHA, A. P. A. R. **Manual de aplicação de produtos fitossanitários**. Viçosa-MG: Viçosa-MG, 2010. 588 p.

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

PPDB. **Data Base de Propriedades de Pesticidas**. Universidade de Hertfordshire, Disponível em: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/43.htm>. Acesso em: 20 jan. 2019.

PRADO, A. B. C. A. *et al.* Dinâmica de herbicidas aplicados em pré-emergência sobre palha de cana-de-açúcar em diferentes regimes hídricos. **Revista Brasileira de Herbicidas**, Brasília-DF, v. 12, n. 2, p. 179-187, 2013.

REDDY, K. N. *et al.* Chlorimuron ethyl sorption and desorption kinetics in soil and herbicide-desiccated cover crop residues. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v. 43, n. 10, p. 2752-2757, 1995.

RODRIGUES B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 7. ed. Londrina: Editor, 2018. 764 p.

- RODRIGUES, B. N. *et al.* Influência da cobertura morta no comportamento do herbicida trifluralin. **Planta Daninha**, Londrina, v. 16, n. 2, p. 163-173, 1998.
- ROSSI, C. V. S. *et al.* Dinâmica do herbicida metribuzin aplicado sobre palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 31, p. 223-230, 2013.
- SAS - STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM version 9.1.3. Cary: SAS Institute, 2002.
- SHANER, D. L. **Herbicide handbook**. 10. ed. Lawrence: Weed Science Society of America, 2014. 513 p.
- SILVA, G. R. *et al.* Persistência do fomesafen em argissolo vermelho-amarelo em dois sistemas de cultivo. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 32, n. 2, p. 377-384, 2014.
- SILVA, A. A.; SILVA, J. F. **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa-MG: Universidade Federal de Viçosa, 2007. 367 p.
- SIMONE, F. *et al.* Eficácia de imazapic e sulfentrazone sobre cyperus rotundus em diferentes condições de chuva e palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 24, n. 4, p. 769-778, 2006.
- SOUZA, M. D. **Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. (Documentos, 37).
- SPAROVEK, G.; SCHNUG, E. Temporal erosion induced soil degradation and yield loss. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1479-1486, 2001.
- SZCZERBOWSKI, D. *et al.* Sugarcane biomass for biorefineries: comparative composition of carbohydrate and non-carbohydrate components of bagasse and straw. **Carbohydrate Polymers**, Barking, v. 114, p. 95-101, 2014.
- TOFOLI, G. R. *et al.* Dinâmica do tebuthiuron em palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 27, n. 4, p. 815-821, 2009.
- TOFOLI, G. R. *et al.* Dinâmica de atrazina em palha de ave e cana-de-açúcar. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 23., 2002. Gramado, RS. **Anais...** Gramado: SBPCPD, 2002. p.158.
- TONIETO, T. A. P.; REGITANO, J. B. Effects of straw decomposition degree on leaching and weed control efficacy of tebuthiuron and hexazinone in green sugarcane harvesting. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 32, n. 4, p. 809-815, 2014.
- TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L.; RODRIGUES, J. C. S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília-DF, v. 30, n. 12, p.1375-1387, 1995.
- ULGUIM, A. R.; KRUSE, N. D. Formulação, misturas e interações. *In*: Disciplina ministrada na Universidade Federal de Santa Maria, 2019, Santa Maria. **Aula...** Santa Maria: UFSM, 2019. p. 1-13.

VAZ, L. R. L. **Perdas de hexazinone e diuron por escoamento superficial em sistema de cana crua**. 73 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

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. **Palestras...** Foz do Iguaçu: SBCPD, 2000. p. 148-164.

VIDAL, R. **Ação dos herbicidas**. Porto Alegre: Edição do Autor, 2002. 89 p.

VITTI, A. C. *et al.* Mineralização da palhada e crescimento de raízes de cana-de-açúcar relacionados com a adubação nitrogenada de plantio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 32, n. esp, p. 2757-2762, 2008.