

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM AGRONOMIA

James Newton Rodrigues dos Santos

ANÁLISE RESIDUAL DO HERBICIDA SULFENTRAZONE NO SOLO

São João Evangelista

2025

JAMES NEWTON RODRIGUES DOS SANTOS

ANÁLISE RESIDUAL DO HERBICIDA SULFENTRAZONE NO SOLO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto de Paula
Coorientador: Dr. Valdevino Pereira Silva

São João Evangelista
2025

S237a Santos, James Newton Rodrigues dos.
Análise residual do herbicida sulfentrazone no solo/ James Newton Rodrigues dos Santos – 2025.

34f.;il.

Orientador: Dr. José Roberto de Paula.

Coorientador: Dr. Valdevino Pereira Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Agronomia) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2025.

1. Sulfentrazone. 2. Herbicidas pré-emergentes. 3. Efeito residual.
I. Santos, James Newton Rodrigues dos. II. Instituto Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 631.8


Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

James Newton Rodrigues dos Santos


ANÁLISE RESIDUAL DO HERBICIDA SULFENTRAZONE NO SOLO

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* São João Evangelista como exigência parcial para obtenção do título de Bacharel em Agronomia.


Aprovado em: 19/11/2025 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **JOSE ROBERTO DE PAULA**
Data: 07/01/2026 11:09:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Roberto de Paula – IFMG (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **VALDEVINO PEREIRA SILVA**
Data: 07/01/2026 11:19:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Valdevino Pereira Silva – IFMG (Coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **ARI MEDEIROS BRAGA NETO**
Data: 07/01/2026 12:05:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Ari Medeiros Braga Neto – IFMG

RESUMO

Atualmente, as plantas daninhas geram sérios danos à agricultura brasileira, afetando todas as fases, desde o plantio até a colheita. A falta de controle das plantas daninhas pode comprometer a qualidade do produto final, resultando em perdas significativas. O método mais utilizado para o controle de plantas daninhas é através do método químico, principalmente devido à sua maior eficácia em áreas de cultivo com grandes infestações. Deste modo, o objetivo deste estudo foi avaliar o efeito residual do sulfentrazone, recomendada para aplicação em pré-emergência nos cultivos de eucalipto, soja e cana-de-açúcar, considerando as interações entre a dose aplicada, a textura do solo e a profundidade. O primeiro fator avaliado foi a dose do herbicida, em que foram aplicadas doses de 0, 250, 500 e 750 g ha⁻¹ do princípio ativo sulfentrazone. O segundo fator do experimento, refere-se às profundidades de coleta de solo, 0 a 10 cm e 10 a 20cm. Para determinar o período residual do herbicida, foi utilizado um bioensaio tendo como planta indicadora *Sorgum vulgare*. Aos 93 dias após a aplicação (DAA), foi realizada uma análise cromatográfica para quantificar os resíduos do herbicida. As plantas de *Sorgum vulgare* apresentaram variações na intoxicação e na distribuição de biomassa em função do herbicida, do solo e da dose aplicada, especialmente em solo arenoso. Após a análise concluiu-se que o herbicida sulfentrazone, apresenta uma persistência significativa em diferentes tipos de solo, causando injúrias nas plantas bioindicadoras por um período de até 273 dias após a aplicação (DAA), especialmente na camada de 0-10 cm dos solos arenoso e argiloso. Na camada de 10-20 cm, essas injúrias foram registradas entre 63 e 93 DAA no solo arenoso, enquanto no solo argiloso os danos iniciaram aos 63 DAA e se mantiveram até o final do período avaliado. A análise das quantidades de sulfentrazone remanescente aos 93 DAA indicou que, no solo arenoso, os valores recuperados nas doses de 250, 500 e 750 g ha⁻¹, distribuídas nas camadas de 0-20 cm, foram de 59,3 g ha⁻¹; 137,5 g ha⁻¹ e 206,5 g ha⁻¹, respectivamente. No solo argiloso, os valores encontrados para as mesmas doses e camadas foram de 65,5 g ha⁻¹; 110,9 g ha⁻¹ e 185,1 g ha⁻¹, respectivamente. Esses dados evidenciam a necessidade de um manejo cauteloso do sulfentrazone, levando em consideração sua alta persistência no solo e o potencial de causar danos às plantas ao longo do tempo.

Palavras-chave: Sulfentrazone. Herbicidas pré-emergentes. Efeito residual.

ABSTRACT

Currently, weeds cause serious damage to Brazilian agriculture, affecting all phases from planting to harvesting. Lack of control over specific weeds can compromise the quality of the final product, resulting in significant losses. The most widely used method for controlling weeds is chemical control, mainly due to its greater effectiveness in heavily infested areas. Therefore, the objective of this study was to evaluate the residual effect of sulfentrazone, recommended for pre-emergence application in eucalyptus, soybean, and sugarcane crops, considering the interactions between the applied dose, soil texture, and depth. The first factor evaluated was the herbicide dose, with doses of 0, 250, 500, and 750 g ha⁻¹ of the active ingredient sulfentrazone applied. The second factor of the experiment refers to the soil sampling depths: 0 to 10 cm and 10 to 20 cm. To determine the residual period of the herbicide, a bioassay was used with *Sorghum vulgare* as the indicator plant. At 93 days after application (DAA), a chromatographic analysis was performed to quantify herbicide residues. *Sorghum vulgare* plants showed variations in intoxication and biomass distribution depending on the herbicide, soil type, and applied dose, especially in sandy soil. The analysis concluded that the herbicide sulfentrazone exhibits significant persistence in different soil types, causing injury to bioindicator plants for up to 273 days after application (DAA), particularly in the 0-10 cm layer of sandy and clayey soils. In the 10-20 cm layer, these injuries were recorded between 63 and 93 DAA in sandy soil, while in clay soil the damage began at 63 DAA and persisted until the end of the evaluation period. Analysis of the amounts of sulfentrazone remaining at 93 DAA indicated that, in sandy soil, the values recovered at doses of 250, 500, and 750 g ha⁻¹, distributed in the 0-20 cm layers, were 59.3 g ha⁻¹; 137.5 g ha⁻¹ and 206.5 g ha⁻¹, respectively. In clay soil, the values found for the same doses and layers were 65.5 g ha⁻¹; 110.9 g ha⁻¹ and 185.1 g ha⁻¹, respectively. These data highlight the need for careful management of sulfentrazone, taking into account its high persistence in the soil and its potential to cause damage to plants over time.

Keywords: Sulfentrazone. Pre-emergent herbicides. Residual effect.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fórmula estrutural do herbicida sulfentrazone	14
Figura 2 - Canteiros em solo arenoso (A) e argiloso (B), na área experimental do IFMG <i>Campus</i> São João Evangelista – São João Evangelista, MG.....	14
Figura 3 - Valores de precipitação (mm), temperatura compensada média (°C), umidade relativa média (%).	14
Figura 4 - Aplicação de herbicida no solo arenoso (A) e no solo argiloso (B) na área experimental do IFMG <i>Campus</i> de São João Evangelista – São João Evangelista, MG.	16
Figura 5 - Destaque para o sistema de irrigação na área experimental do IFMG <i>Campus</i> de São João Evangelista – São João Evangelista, MG.	16
Figura 6 - Bioensaios em casa de vegetação.....	18
Figura 7 - Porcentagem de sulfentrazone recuperada em diferentes profundidades de solos arenoso (esquerda) e argiloso (direita), utilizando as doses de 250, 500 e 750 g ha ⁻¹ aos 93 DAA.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características físico-químicas do solo de cada área experimental (0-20cm).....	15
Tabela 2 - Tratamento do experimento de campo, São João Evangelista, Minas Gerais, Brasil, 2020.....	17
Tabela 3 - Conceitos atribuídos à toxicidade de herbicidas, segundo a escala adaptada do EWRC	19
Tabela 4 - Médias de intoxicação (%) em plantas de sorgo para doses de sulfentrazone, coletadas em oito épocas após a aplicação, em solo arenoso e argiloso, nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm.	21
Tabela 5 - Médias de massa seca (g) de plantas de sorgo cultivadas durante 21 dias após a emergência (DAE) em solos arenoso e argiloso coletadas em oito épocas após a aplicação do herbicida sulfentrazone e em diferentes doses, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm.	24
Tabela 6 - Concentração total de sulfentrazone recuperada e dissipada em solos arenoso e argiloso, utilizando as doses de 250, 500 e 750 g ha ⁻¹ aos 93 DAA.....	25

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REFERENCIAL	10
2.1	Origem e incidência das plantas daninhas.....	10
2.2	Herbicidas	10
2.3	Persistência e lixiviação dos herbicidas.....	11
2.4	Efeito residual de herbicidas	12
2.5	Sulfentrazone (Solara 500®)	12
3	METODOLOGIA.....	14
3.1	Experimento 1 em campo.....	17
3.2	Experimento 2 em campo.....	17
3.3	Experimentos em casa de vegetação com sorgo.....	17
3.4	Características avaliadas.....	19
3.5	Condições cromatográficas e espectrometria de massas.....	19
3.6	Análises estatísticas.....	20
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	21
4.1	Fitotoxicidade.....	21
4.2	Matéria seca	23
4.3	Herbicida remanescente	25
5	CONCLUSÃO	29
	REFERÊNCIAS	30

1. INTRODUÇÃO

As plantas daninhas representam um dos principais desafios à agricultura brasileira, interferindo em todas as fases do ciclo produtivo, desde a implantação até a colheita. Esse impacto eleva os custos de produção e compromete a quantidade e a qualidade do produto final. O manejo mais utilizado para o controle dessas plantas ocorre através da utilização de herbicidas, por apresentarem uma maior eficiência em lavouras com grandes infestações, principalmente em grandes áreas (DECHOUM; ZILLER, 2013). Contudo, devem ser averiguados os possíveis danos que o uso destes defensivos pode ocasionar a fauna e a flora e também a saúde humana.

Por via de regra, após a aplicação, os herbicidas podem ser absorvidos pela parte aérea das plantas ou atingir diretamente o solo, onde estão propensos a sofrer processos físico-químicos, os quais irão definir o tempo de persistência e seu destino no ambiente (MANCUSO *et al.*, 2011).

Herbicidas são produtos químicos que, em sua dosagem adequada tem o objetivo de controlar ou erradicar grupos de espécies invasoras (CORREIA, 2018), permitindo à cultura de interesse um desenvolvimento em ambiente livre ou com pouca competição. Porém, o uso exacerbado desrespeitando os limites de dosagem pode ocasionar resquícios de herbicidas no solo, que por sua vez podem afetar o desenvolvimento da cultura em sucessão (carryover) (MELO *et al.*, 2016).

Com a crescente necessidade de um uso mais consciente dos insumos agrícolas e da redução dos impactos ambientais, diversos estudos têm buscado compreender o comportamento dos herbicidas no solo. Assim, torna-se fundamental entender a dinâmica desses compostos frente às características do clima, do solo e às propriedades específicas de cada herbicida (MANCUSO *et al.*, 2011).

O comportamento de um herbicida no solo é influenciado por processos de retenção, transformação e transporte que ocorrem imediata e/ou simultaneamente após sua aplicação (WEBER; MILLER, 1989). A persistência de um herbicida no solo é dependente de características físico-químicas da molécula, como a constante de equilíbrio de ionização do ácido (pKa), o coeficiente de partição octanol-água (Kow), a solubilidade em água (Sw), a pressão de vapor (PV) (GONÇALVES *et al.*, 2018). A persistência no solo é também influenciada pelas condições climáticas e outros parâmetros como pH, teor de matéria orgânica, granulometria e capacidade tampão (MANCUSO *et al.*, 2011). O manejo pode interferir na duração do herbicida no solo, influenciando na eficiência de controle, o potencial de injúria às

culturas em sucessão e o risco de contaminação ambiental (NIEKAMP & JOHNSON, 2001; FERRI & VIDAL, 2002).

Estudos com foco no efeito residual de herbicidas no solo, são de extrema importância para que haja recomendações de uso adequadas, com vistas à diminuição dos impactos ambientais. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito residual do herbicida sulfentrazone no solo ao longo do tempo, considerando diferentes doses, texturas de solo e profundidades de coleta.

2. REFERENCIAL

2.1 Origem e incidência das plantas Daninhas

O surgimento da população humana permitiu a perpetuação deste tipo de vegetação, pois o homem criou nichos adequados ao seu crescimento e desenvolvimento. Não há dúvidas de que foi desta vegetação que o homem desenvolveu a maioria de suas espécies cultivadas e estabeleceu a base para sua atividade agropecuária. As outras espécies pioneiras não domesticadas mantiveram-se habitando as áreas ocupadas pelo homem, ocasionando uma série de entraves ao desenvolvimento da agropecuária e recebendo o conceito de plantas daninhas. No entanto, tratam-se de plantas pioneiras, as quais encontram no agroecossistema, nichos disponíveis e adequados a perpetuação de sua espécie (PITELLI, 1998).

Plantas com características pioneiras, via de regra, possuem grande agressividade caracterizada por elevada e prolongada capacidade de produção de diásporas dotadas de altas viabilidades e longevidades, que são capazes de germinar, de maneira descontínua, em muitos ambientes e que possuem adaptações especiais para disseminação a curta e longa distância; são que normalmente apresentam rápidos crescimento vegetativo e reprodutivo (PITELLI, 1987).

2.2 Herbicidas

Herbicidas são substâncias químicas que são capazes de selecionar populações de plantas (ZIMDHAL *et. al.*, 1993), e possuem atividade biológica que exercem um papel valioso na produção de alimentos no mundo (STEPHENSON *et al.*, 2006).

Para identificação de herbicidas é necessário agrupá-los de acordo com seus mecanismos de ação nas plantas e com suas estruturas químicas básicas. Em tese, herbicidas que pertencem à mesma família química por via de regra causam sintomas semelhantes em plantas suscetíveis, todavia, existem exceções à regra. Pode haver casos em que sintomas similares são apresentados pelas plantas, mesmo quando atingidas por herbicidas com mecanismos de ação distintos (ZIMDHAL,1993).

Os mecanismos de ação estão relacionados ao primeiro passo bioquímico e biofísico no interior celular a ser inibido pela atividade do herbicida. Essa primeira etapa pode ser suficiente para eliminar espécies sensíveis. Entretanto, diversas outras reações são necessárias para eliminar uma planta e esse somatório é chamado de modo de ação. Os herbicidas atuam

geralmente inibindo a atividade de uma enzima/proteína na célula induzindo uma série de eventos que matam ou inibem o desenvolvimento da célula (VIDAL, 1997).

Por conseguinte, devem ser explicitadas as diferenças entre mecanismo de ação e modo de ação. Aceita-se que mecanismo de ação se refere ao primeiro ponto de atuação do herbicida no metabolismo da planta, assim sendo o primeiro de uma série de eventos metabólicos que ocasionam a expressão final do herbicida na planta. A totalidade desses eventos, somados aos sintomas visíveis da ação do herbicida sobre a planta, é denominado modo de ação (OLIVEIRA JUNIOR, 2011).

2.3 Persistência e lixiviação dos herbicidas

O período de permanência de um herbicida no solo após sua aplicação pode indicar sua eficiência no controle de plantas daninhas, sendo denominado período residual. Ou, de maneira oposta, originar problemas tais como: danos à cultura subsequente e o risco de lixiviação e contaminação ambiental, sendo então, denominada persistência (ROSS; LEMBI, 1999).

A persistência dos herbicidas no solo varia com a adsorção, lixiviação e degradação e/ou transformação biológica, pois esses fatores regulam a concentração, o fluxo e o tempo de permanência destas moléculas na solução do solo (LOUX *et al.*, 1989).

O processo de degradação de herbicidas é explicado por Brum *et al* (2013), como a quebra das moléculas desses defensivos em compostos menores, de forma biótica ou abiótica, tornando-as, na maioria das vezes, menos tóxicas que as moléculas originais

A adsorção é uma operação unitária que se baseia na transferência de massa. Nesse processo, ocorre a separação das substâncias de um fluido através de um sólido que concentra em sua superfície uma das substâncias do fluido, separando-as (NASCIMENTO *et al.*, 2020).

O processo de lixiviação ou percolação é uma das principais formas de transporte no solo das moléculas não-voláteis e solúveis em água. Essas moléculas se movimentam no perfil do solo, acompanhando o fluxo de água, pela diferença de potencial de água entre dois pontos (PRATA *et al.*, 2003). Para que ocorra a lixiviação, é necessário que os herbicidas estejam na solução do solo, livre ou adsorvido em pequenas partículas (FERRI *et al.*, 2003).

Afim de quantificar a persistência de herbicidas no solo, diversos métodos podem ser adotados, como espectrometria de massa, cromatografia e o uso de plantas indicadoras (bioensaios), os quais permitem determinar a permanência de compostos no solo (KEARNEY; KAUFMAN, 1988).

Dentre esses métodos, os bioensaios apresentam como principal vantagem detectar somente resíduos biologicamente ativos, sem necessidade de equipamentos onerosos ou de extração prévia dos compostos do solo. Contudo, seus resultados são semiquantitativos e exigem curvas de calibração específicas para cada herbicida e para cada espécie indicadora (KEARNEY; KAUFMAN, 1988).

Assim, o método de bioindicadores é simples, rápido e de baixo custo sendo possível avaliar o tempo do resíduo com bioatividade, podendo assim, além de avaliar seu impacto ambiental, estimar o tempo em que o herbicida pode permanecer no solo e afetar culturas sensíveis, em um sistema de sucessão ou rotação de culturas (Blanco *et al.*, 2010).

2.4 Efeito residual de herbicidas

Herbicidas que apresentam efeito residual maior que o período de intervalo entre os cultivos podem ocasionar efeitos negativos em culturas posteriores, devido a existência de resíduos que permanecem no solo em quantidade que proporcionam injúrias as plantas, sendo moléculas dos herbicidas ou seus metabólicos, e este efeito recebe o nome de carryover (CONSTANTIN *et al.*, 2013).

Processos importantes como a degradação são fundamentais para atenuação dos níveis de resíduos dos herbicidas no solo (GUO *et al.*, 2000). Este processo se refere à quebra das moléculas de herbicidas em compostos menores, de forma biótica ou abiótica tornando-as, na maioria dos casos, menos tóxicas que as moléculas originais (BRUM *et al.*, 2013). As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, tais como pH, textura, teor de carbono orgânico e atividade microbiana, são de grande importância no estudo da degradação de agrotóxicos no solo pois influenciam a taxa de degradação (DOLAPTSOGLU *et al.*, 2007; MUELLER *et al.*, 2010; WANG *et al.*, 2010; LOURENCETTI *et al.*, 2012).

2.5 Sulfentrazone (Solara 500®)

O sulfentrazone é um herbicida pré-emergente do grupo químico ariltriazolinonas, que atua inibindo a enzima protoporfirinogênio oxidase, um intermediário importante na síntese da clorofila em plantas (JACOBS & JACOBS, 1987; REDDY & LOCKE, 1998).

Pode ser aplicado em pré-plantio incorporado ou, preferencialmente, em pré-emergência, imediatamente após o plantio ou semeadura das culturas, no controle de várias

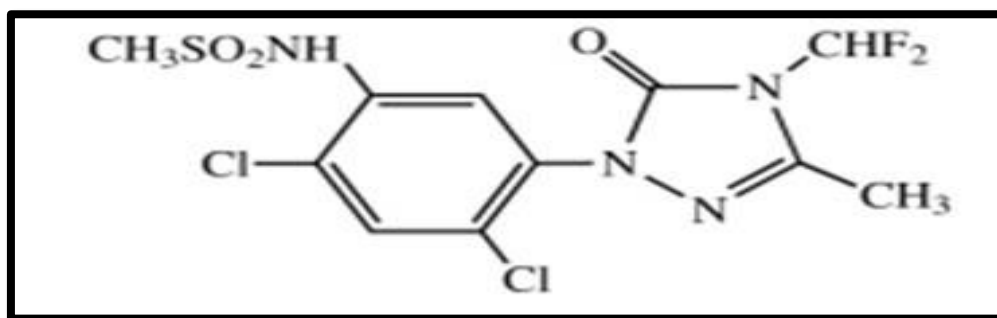
espécies de plantas daninhas, mono e dicotiledôneas, em culturas de cana-de-açúcar, soja, café, eucalipto e fumo, além do seu uso em pátios industriais (RODRIGUES; ALMEIDA, 2005).

O sulfentrazone tem mobilidade elevada e certa persistência no solo, permanece muito móvel nas colunas de solo e água o que permite a lixiviação. Apresenta solubilidade em água de 110 mg L^{-1} (pH 6,0), Koc médio de 43 mL g^{-1} , pressão de vapor $1,07 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ (25°C), densidade de $0,53 \text{ g mL}$ (25°C) e constante de dissociação (pKa) é 6,5. Com estas propriedades, o sulfentrazone é altamente móvel e persistente no solo, tem um forte potencial de lixiviação para as águas subterrâneas e movimentação por escoamento superficial (RODRIGUES; ALMEIDA, 2011).

O herbicida sulfentrazone tem-se revelado persistente em solos brasileiros (MARTINEZ *et al.*, 2008). Estudos revelaram que a meia-vida do sulfentrazone pode variar de 110 a 280 dias, dependendo do solo e das condições ambientais (HATZIOS, 1998). OHMES *et al.* (2000), relataram que a degradação microbiana é um mecanismo importante na dissipação do sulfentrazone uma vez que a degradação foi muito lenta em solos autoclavados.

Solara 500[®], cujo princípio ativo é sulfentrazone, figura 1, possui solubilidade de 780 mg L^{-1} (pH 7), pressão de vapor de $1 \times 10^{-9} \text{ mmHg}$ a 25°C , constante de dissociação (pK) de $-6,56$ e coeficiente de partição (Kow) de $-9,8$ (pH 7). É um ácido com ionização em solução aquosa, em função do seu pK e do índice pH do meio (WEBER, 1970). O seu modo de ação se caracteriza como destruidor de membranas celulares, inibindo a enzima protox, havendo o acúmulo da protoporfirina IX, o que leva à peroxidação do O_2 e, por consequência, à destruição das membranas celulares (HESS, 1993).

Figura 1. Fórmula estrutural do herbicida sulfentrazone.

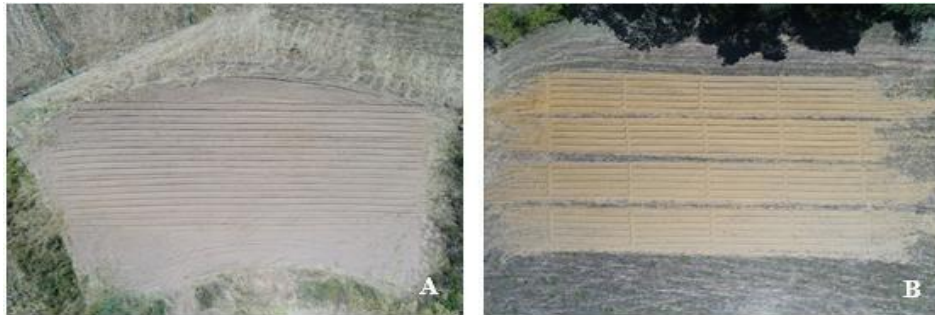


Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3. METODOLOGIA

Foram conduzidos dois experimentos em campo (experimento 1 solo arenoso; experimento 2 solo argiloso), figura 2, e quatro experimentos em casa de vegetação, todos no Instituto Federal de Minas Gerais – IFMG – *Campus* São João Evangelista – MG.

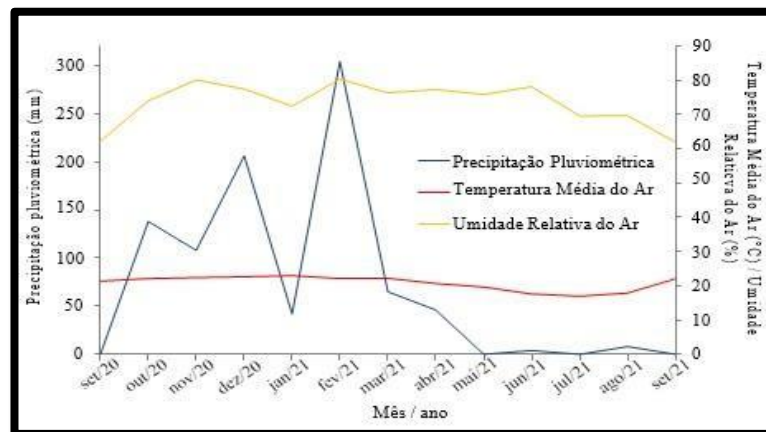
Figura 2 - Canteiros em solo arenoso (A) e argiloso (B), na área experimental do IFMG *Campus* São João Evangelista – São João Evangelista, MG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

As regiões do estudo se encontram na cidade de São João Evangelista, no leste de Minas Gerais, e apresentam as seguintes coordenadas geográficas (latitudinal: $-18^{\circ} 32' 52''$; longitudinal: $-42^{\circ} 45' 48''$) e altitude de 690 metros. Os dados médios de temperatura do ar, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica durante a condução do experimento são apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Valores de precipitação (mm), temperatura compensada média ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa média (%).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

Os experimentos de campo foram conduzidos na área experimental do IFMG – *Campus* São João Evangelista, denominada João Miranda, qual possui Latossolo Vermelho Amarelo. Os experimentos em ambiente protegido (casa de vegetação) foram conduzidos no viveiro de mudas, também localizado no IFMG – *Campus* São João Evangelista. Para isso foram utilizados vasos de polietileno com capacidade para 0,2 dm³.

As áreas dos experimentos de campo apresentam topografia levemente ondulada. As características físico-químicas dos solos trabalhados estão representadas na tabela 1. As densidades médias aparentes dos solos das áreas arenosas e argilosas na camada de 0 a 20 cm foram respectivamente de 1,32 g cm⁻³ e de 1,13 g cm⁻³.

Tabela 1 - Características físico-químicas do solo de cada área experimental (0-20cm). IFMG – *Campus* São João Evangelista, MG, 2020.

Textura	Análise granulométrica (%)			pH ¹ H ₂ O	M.O ² dag Kg ⁻¹	CTC (T) ³ Cmol _c dm ⁻³	V ⁴ %
	Argila	Silte	Areia				
1 - Arenosa	14,4	26,6	63,0	5,31	1,41	4,35	50,7
2 - Argilosa	62,8	27,2	10,0	5,88	1,41	5,19	67,9

¹ = pH em água; ² = Matéria Orgânica; ³ = Capacidade de troca catiônica pH 7,0; ⁴ = Índice de saturação de bases.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após o preparo do solo (aração e gradagem), efetuou-se o encanteiramento da área. Cada canteiro apresentou as seguintes dimensões: 0,7 m de largura por 10 metros de comprimento.

Os experimentos 1 e 2, respectivamente, com solo arenoso e argiloso, foram conduzidos em delineamento em blocos casualizados, em esquema fatorial 4 x 2, sendo o fator 1, 4 doses e fator 2 duas profundidades de coleta das amostras e 4 repetições, totalizando 32 parcelas. Cada parcela apresentando área útil correspondente de 7 m², e a área total de 224 m² na superfície.

Os procedimentos utilizados para a aplicação dos herbicidas e coleta de dados foram idênticos para ambos os experimentos de campo e seguiram o seguinte protocolo: Aplicação do herbicida realizada com o auxílio de um pulverizador costal elétrico equipado com uma barra de pulverização contendo um bico do tipo leque Teejet 110.02, com um volume de aplicação de 200 litros de calda por hectare (Figura 4). A dose zero, ou seja, a testemunha, não foi submetida a nenhum tratamento. Após a aplicação do herbicida, todas as parcelas receberam, de forma dispersa, sementes de braquiária brizanta e capim amargoso.

Figura 4 - Aplicação de herbicida no solo arenoso (A) e no solo argiloso (B) na área experimental do IFMG *Campus* de São João Evangelista – São João Evangelista, MG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Antes da aplicação dos herbicidas, houve necessidade de irrigar a área, uma vez que o solo apresentava-se extremamente seco devido a um longo período de estiagem. A irrigação teve como propósito aumentar a umidade do solo e estimular a germinação das sementes presentes no solo (Figura 5).

Figura 5 - Sistema de irrigação na área experimental do IFMG *Campus* de São João Evangelista – São João Evangelista, MG.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Três dias após a aplicação dos herbicidas, coletou-se solo nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm, em cada parcela do experimento. Este procedimento, de coleta do solo foi realizado em intervalos de 30 em 30 dias. O solo coletado foi destorroado, peneirado e homogeneizado e levado à casa de vegetação, para posterior semeio com sementes de sorgo (cultura bioindicadora), visando a condução dos bioensaios para verificar a existência de possíveis resíduos do herbicida no solo ao longo do tempo.

Ambos os experimentos de campo, Experimentos 1 e 2, foram tratados com a mesma metodologia e concentração de aplicação que estão expressos na tabela 2.

Tabela 2 - Tratamento do experimento de campo, São João Evangelista, Minas Gerais, Brasil, 2020

Trat.	Princípio ativo do herbicida	Nome Comercial	Dose	
			Produto comercial (L ha ⁻¹)	Princípio ativo (g ha ⁻¹)
T1			0	0
T2			0,5	250
T3	Sulfentrazone	Solara 500 [®]	1	500
T4			1,5	750

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

3.1 Experimento 1 em campo

A área utilizada para a implementação do experimento, anteriormente foi utilizada com o cultivo de mandioca, os restos culturais foram retirados para a preparação do solo com aração e gradagem.

3.2 Experimento 2 em campo

A área selecionada para instalação do experimento 2, foi cultivada anteriormente com milho para silagem. O material orgânico que permaneceu na área após a colheita foi incorporado no momento da aração e gradagem, durante o preparo do solo para a aplicação dos herbicidas.

3.3 Experimentos em casa de vegetação com sorgo

Três dias após a aplicação dos herbicidas, iniciou-se as coletas de amostras de solo para avaliar o efeito residual por meio de bioensaios. Essas amostragens ocorreram em oito momentos distintos (3; 33; 63; 93; 123; 153; 213; 273 dias após a aplicação - DAA). As coletas foram realizadas em duas profundidades, de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, em cada parcela experimental. Utilizou-se uma enxada e um gabarito marcado com as referências de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm para orientar o processo. Cada amostra, suficiente para preencher três vasos

de 200 cm³, foi retirada na superfície de cada parcela experimental, nas profundidades mencionadas no gabarito. Amostras com peso entre 800 a 1000 g, foram desagregadas, peneiradas com uma malha de 6 mm, homogeneizadas e armazenadas em sacos plásticos identificados.

A primeira coleta foi realizada em setembro de 2020, três dias após a aplicação dos herbicidas, e as subseqüentes ocorreram a cada 30 dias, desde que houvesse precipitação suficiente para garantir a ação dos herbicidas em questão.

Dos solos provenientes dos sacos plásticos identificados dos experimentos de campo, de acordo com as parcelas experimentais e nas profundidades de 0 a 10 cm e de 10 a 20 cm, foram utilizados 600 cm³ para preencher três vasos com capacidade de 0,2 dm³ cada, destinados aos bioensaios (Figura 6). Após o preenchimento, quatro sementes de sorgo (*Sorghum vulgare*) foram semeadas em cada vaso. Os vasos foram irrigados diariamente por microaspersão, conforme necessário, para manter a umidade propícia ao desenvolvimento das plantas bioindicadoras cultivadas. Sete dias após a germinação do sorgo, realizou-se um desbaste, mantendo apenas três plantas por vaso. O controle manual de plantas daninhas foi efetuado ao longo dos 21 dias de cultivo.

Figura 6 - Bioensaios em casa de vegetação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 2 x 4 sendo fator 1, duas profundidades de coleta e fator 2, quatro doses, com 4 repetições, sendo 3 vasos por parcela experimental, totalizando 96 vasos por coleta para cada tipo de solo. Os vasos foram dispostos aleatoriamente sobre uma bancada de 1 metro de largura por três metros de comprimento e altura de 1 metro.

3.4 Características avaliadas

Os sintomas visuais de toxicidade foram avaliados, nas plantas de sorgo, aos sete e vinte dias após a emergência das plantas, seguindo a escala adaptada do EWRC (European Weed Research Council) (Tabela 3).

Tabela 3. Conceitos atribuídos à toxicidade de herbicidas, segundo a escala adaptada do EWRC

Toxicidade (%)	Interpretação
0 – 10	Nulo
11 – 20	Muito leve
21 – 30	Leve
31 – 60	Moderado
61 – 70	Forte
71 – 90	Muito forte
91 – 100	Morte

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025

A determinação da matéria seca da parte aérea foi realizada aos 21 dias após a emergência, para tanto, as plantas foram coletadas e colocadas em estufa de ventilação forçada a $65 \pm 2^\circ\text{C}$ por 72 horas.

3.5 Condições cromatográficas e espectrometria de massas

A quantificação do herbicida sulfentrazone foi realizada utilizando Cromatografia Líquida de Ultra Performance (UHPLC) Nexera X2 da Shimadzu, equipado com duas bombas LC-30AD, um desgaseificador DGU-20A5R, um autoamostrador Sil-30AC, um forno de coluna CTO-30AC e um controlador CBM-20A. A separação ocorreu em uma coluna Restek Pinnacle DB AQ C18 de tamanho 50 x 2,1 mm, com partículas de 1,9 μm . As condições cromatográficas incluíram um fluxo de 0,20 mL min⁻¹, volume de injeção de 5 μL e temperaturas do amostrador e do forno da coluna de 15 e 40 $^\circ\text{C}$, respectivamente.

A fase móvel consistiu em água grau HPLC com 0,1% de ácido fórmico como fase A e acetonitrila grau HPLC como fase B. A eluição ocorreu de forma isocrática, com um fluxo de 65% de fase B. O espectrômetro de massa triplo quadrupolo da série LCMS-8040, também da

Shimadzu, com fonte de ionização por eletrospray (ESI), foi operado nos modos de ionização positivo e negativo.

Essas condições cromatográficas específicas proporcionaram uma separação eficaz do sulfentrazone e permitiram a sua quantificação por meio de técnicas de espectrometria de massa.

3.6 Análises estatísticas

As avaliações visuais dos eventuais sintomas de toxidez aos herbicidas nas plantas de sorgo, foram analisadas utilizando-se estatística descritiva.

Realizou-se a análise de variância utilizando o teste F a 5% de probabilidade. Os resultados obtidos da matéria seca da parte aérea das plantas de sorgo foram submetidos à análise de média de cada tratamento. As variáveis cujo teste F apresentaram-se significativos tiveram suas médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. Utilizou-se o Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas (SAEG), para as análises processadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Fitotoxicidade

As plantas de sorgo (*Sorghum vulgare*) que desenvolveram em solos contaminados com o princípio ativo sulfentrazone, solara 500®, exibiram níveis variados de toxicidade, dependendo da textura do solo, da profundidade de coleta e as quantidades de herbicida aplicado (Tabela 4).

Tabela 4 - Médias de intoxicação (%) em plantas de sorgo para doses de sulfentrazone, coletadas em oito épocas após a aplicação, em solo arenoso e argiloso, nas profundidades de 0 a 10 e 10 a 20 cm.

Dose (g ha ⁻¹)	Dias Após Aplicação (DAA)															
	3	33	63	93	123	153	213	273								
----- Arenoso - Profundidade 0-10cm -----																
0	0,0	b	0,0	b	0,0	c	0,0	b	0,0	b	0,0	B	0,0	a	0,0	b
250	75,0	a	72,8	a	50,0	b	11,3	b	5,0	b	0,0	B	0,0	a	0,0	b
500	100,0	a	90,8	a	92,5	a	57,5	a	27,5	ab	5,0	B	5,0	a	7,5	b
750	100,0	a	100,0	a	90,0	a	70,6	a	47,5	a	30,5	A	22,5	a	45,0	a
----- Arenoso - Profundidade 10-20cm -----																
0	0,0	a	0,0	a	0,0	c	0,0	a	0,0	a	0,0	A	0,0	a	0,0	a
250	0,0	a	0,0	a	10,0	bc	15,0	a	6,3	a	0,0	A	0,0	a	0,0	a
500	0,0	a	0,0	a	37,5	b	15,0	a	6,3	a	0,0	A	0,0	a	0,0	a
750	0,0	a	0,0	a	75,0	a	25,0	a	10,0	a	0,0	A	0,0	a	12,5	a
----- Argiloso - Profundidade 0-10cm -----																
0	0,0	b	0,0	c	0,0	c	0,0	c	0,0	b	0,0	C	0,0	b	0,0	b
250	100,0	a	91,0	b	72,5	b	36,9	b	22,5	b	0,0	C	0,0	b	12,5	b
500	100,0	a	91,0	b	85,0	a	54,4	b	63,8	a	25,0	B	15,0	ab	50,0	a
750	100,0	a	100,0	a	90,0	a	76,3	a	83,8	a	55,0	A	40,0	a	45,0	a
----- Argiloso - Profundidade 10-20cm -----																
0	0,0	a	0,0	a	0,0	c	0,0	b	0,0	a	0,0	A	0,0	a	0,0	a
250	0,0	a	0,0	a	15,0	bc	5,0	b	2,5	a	0,0	A	0,0	a	0,0	a
500	0,0	a	0,0	a	32,5	b	15,0	b	12,5	a	0,0	A	7,5	a	7,5	a
750	0,0	a	0,0	a	76,3	a	40,5	a	22,5	a	12,5	A	15,0	a	12,5	a

Médias seguidas pela mesma letra não se diferenciam pelo teste Tukey ao nível de significância de 5% probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

No solo de textura arenosa, profundidade de 0 a 10 centímetros, dose de 750 g ha⁻¹ de sulfentrazone causou intoxicação nas plantas de sorgo até os 273 dias após a aplicação (DAA). Por outro lado, a dose de 250g há⁻¹ provocou intoxicação nas plantas bioindicadoras apenas até

os 63 DAA. Dosagem de 500 g ha⁻¹, proporcionou intoxicação das plantas bioindicadoras até os 123 DAA.

O sulfentrazone aplicado no solo arenoso, coletado na profundidade de 0 a 10 cm, proporcionou intoxicação nas plantas de sorgo na dose de 250 g ha⁻¹ até os 63 DAA. A dosagem de 500 g ha⁻¹, recomendada pelo fabricante para a cultura do eucalipto, proporcionou intoxicação das plantas bioindicadoras até os 93 DAA. Na dose de 750 g ha⁻¹, que corresponde a 1,5 vezes a dose comercial, foi observada intoxicação durante todo o período de avaliação (273 DAA). As plantas bioindicadoras cultivadas em solo argiloso, oriundas da profundidade de 0 a 10 cm, apresentaram injúrias até os 93 DAA, quando utilizada a dose de 250 g ha⁻¹. Nas maiores doses as plantas de sorgo apresentaram injúrias até os 273 DAA.

No solo de textura argilosa, também a 0-10 centímetros de profundidade, a intoxicação nas plantas de sorgo se estende até os 273 DAA com doses de 500 e 750 g ha⁻¹. Enquanto isso, com dose de 250 g ha⁻¹ observou-se lesões nas plantas bioindicadoras até os 123 DAA.

Evidencia-se, portanto, na camada de solo de 0 a 10 centímetros, um comportamento distinto nos dois tipos de solo, arenoso e argiloso, em relação à persistência do sulfentrazone. Isso sugere que o efeito residual do sulfentrazone ao longo do tempo está diretamente relacionado com a quantidade aplicada, sendo que doses maiores exigem mais tempo para sua manipulação no solo.

A meia-vida do sulfentrazone em solos brasileiros é, em média, de 180 dias. (Blanco; Velini 2005), e demonstram uma notável atividade residual no solo em determinadas condições edafoclimáticas locais. Conforme observado por (Monquero *et al.*, 2010), essa atividade residual pode se estender por mais de 280 DAA.

Nas camadas de solo mais profundas, de 10 a 20 cm, houve intoxicação das plantas de sorgo para ambos os tipos de solo, especialmente nas doses de 250 a 750 g ha⁻¹, detectadas aos 63 DAA. No solo argiloso, houve intoxicação significativa até os 93 DAA na dose de 750 g ha⁻¹, mas após esse período, as lesões nas plantas de sorgo diminuíram. Esse efeito de intoxicação coincidiu com os meses de outubro e novembro, época em que ocorreu uma ocorrência acumulada de 246 mm, o que pode ter contribuído para a percolação do sulfentrazone no solo.

Portanto, é possível que a percolação do ingrediente ativo sulfentrazone tenha desempenhado um papel na ocorrência de danos nas plantas de sorgo nas camadas mais profundas do solo. Este herbicida possui natureza ácida fraca com um valor de pKa de 6,56. Em pH abaixo de 6,56, é encontrado principalmente na forma neutra, enquanto em pH acima desse valor, predomina a forma aniônica (Grey *et al.*, 1997). Nos solos examinados (conforme indicado na Tabela 1), tanto o solo arenoso com pH 5,31 quanto o solo argiloso com pH 5,88

foram mais próximos do pKa do herbicida. Nessas condições, o sulfentrazone ocorre predominantemente na solução do solo, o que pode ter facilitado sua percolação para as camadas inferiores.

O solo arenoso utilizado no experimento tinha textura franco arenosa, 63% de areia, pH 5,31 e matéria orgânica de 1,41 dag.kg⁻¹. Enquanto o solo argiloso apresentou textura muito argilosa, 62,8% de argila, pH 5,88 e a mesma quantidade de matéria orgânica, 1,41 dag.kg⁻¹. Esses atributos da análise química do solo podem afetar a interação do herbicida sulfentrazone no solo, influenciando sua sorção e dessorção. O teor de argila e matéria orgânica do solo, de acordo com (FAUSTINO *et al.*, 2015), afeta a mobilidade do sulfentrazone, com maior potencial de lixiviação em solos com menor argila e matéria orgânica. No experimento com solos arenosos e argilosos, o sulfentrazone atingiu a camada mais profunda (10-20 cm) simultaneamente aos 63 dias após a aplicação, possivelmente devido à intensidade das chuvas nos meses anteriores. A persistência do sulfentrazone nos solos é notável, mas sua mobilidade e adsorção dependem do pH da solução e são reduzidas em solos ricos em carbono orgânico (OHMES *et al.*, MULLER, 2000; SZMIGIELSKI *et al.*, 2012).

4.2 Matéria seca

A matéria seca das plantas de *S. vulgare* cultivadas em solos arenoso e argiloso contaminados com sulfentrazone apresentou variação em comparação com as plantas cultivadas em solo sem o herbicida (Tabela 5).

Tabela 5 - Médias de massa seca (g) de plantas de sorgo cultivadas durante 21 dias após a emergência (DAE) em solos arenoso e argiloso coletadas em oito épocas após a aplicação do herbicida sulfentrazone e em diferentes doses, nas profundidades de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm.

Dose (g ha ⁻¹)	Dias Após Aplicação (DAA)							
	3	33	63	93	123	153	213	273
Arenoso - Profundidade 0-10cm								
0	0,64 a	1,37 A	0,68 a	0,89 A	0,97 a	0,29 a	0,34 a	0,90 a
250	0,07 b	0,34 B	0,51 a	0,88 A	0,82 ab	0,27 a	0,30 ab	0,28 b
500	0,00 b	0,06 B	0,09 b	0,59 B	0,60 bc	0,23 ab	0,18 c	0,29 b
750	0,00 b	0,05 B	0,03 b	0,46 B	0,45 c	0,19 b	0,20 bc	0,24 b
Arenoso - Profundidade 10-20cm								
0	0,52 a	0,48 A	0,88 a	0,86 B	1,39 a	0,24 a	0,23 a	0,48 a
250	0,38 a	0,37 A	0,46 b	0,94 A	0,82 b	0,24 a	0,25 a	0,25 b
500	0,33 a	0,27 A	0,53 ab	0,90 Ab	0,71 b	0,22 a	0,19 a	0,27 b
750	0,25 a	0,26 A	0,16 b	0,88 Ab	0,73 b	0,20 a	0,20 a	0,24 b
Argiloso - Profundidade 0-10cm								
0	0,70 a	1,31 A	1,01 a	0,88 A	1,02 a	0,23 a	0,24 a	0,32 a
250	0,00 b	0,02 B	0,38 b	0,78 A	0,83 a	0,24 a	0,25 a	0,34 a
500	0,00 b	0,00 B	0,22 bc	0,54 B	0,47 b	0,20 a	0,21 a	0,22 a
750	0,00 b	0,00 B	0,03 c	0,36 B	0,25 b	0,12 b	0,22 a	0,32 a
Argiloso - Profundidade 10-20cm								
0	0,70 a	0,74 A	1,04 a	0,71 A	1,18 a	0,24 a	0,22 a	0,26 ab
250	0,53 a	0,57 A	0,88 ab	0,83 A	0,89 b	0,23 a	0,21 a	0,29 a
500	0,59 a	0,61 A	0,68 ab	0,73 A	0,74 b	0,23 a	0,22 a	0,20 b
750	0,48 a	0,49 A	0,54 b	0,81 A	0,76 b	0,21 a	0,19 a	0,27 a

Médias seguidas pela mesma letra não se diferenciam pelo teste Tukey ao nível de significância de 5% probabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As plantas bioindicadoras cultivadas no solo arenoso extraído da camada de 0-10 cm de profundidade apresentaram sintomas de injúrias visuais até 63 DAA com a dose de 250 g ha⁻¹ e até 93 DAA com a dose de 500 g ha⁻¹. Houve redução na matéria seca dessas plantas em todas as doses aplicadas até 273 DAA. No solo argiloso, as plantas bioindicadoras cultivadas na camada de 0-10 cm apresentaram redução na matéria seca até 63 DAA com a dose de 250 g ha⁻¹, até 123 DAA com a dose de 500 g ha⁻¹ e até 153 DAA com a dose de 750 g ha⁻¹. Para as plantas cultivadas nos solos contaminados com sulfentrazone extraídos da camada de 10-20 cm, tanto em solo arenoso quanto em solo argiloso, houve redução na matéria seca a partir de 63 DAA. No solo arenoso, houve diferença significativa em relação à testemunha aos 93 e 123 DAA, mas não aos 153 e 213 DAA. No entanto, aos 273 DAA, houve novamente efeito significativo em relação à testemunha, indicando redução da matéria seca das plantas

bioindicadoras. No solo argiloso, houve efeito significativo além dos 63 DAA, também aos 123 e 273 DAA, mas não foram observados esses efeitos aos 93, 153 e 213 DAA.

4.3 Herbicida remanescente

A compreensão dos processos de sorção de herbicidas ao solo é fundamental, uma vez que diversos fatores relacionados ao próprio herbicida, ao tipo de solo e às condições climáticas influenciam sua disponibilidade para as plantas, afetando tanto o controle de plantas daninhas quanto o potencial de impactos ambientais. Em particular, as condições climáticas, com destaque para a precipitação, desempenham um papel crucial no comportamento dos herbicidas, podendo exercer uma influência ainda mais significativa do que as próprias características do solo, conforme observado por (Kočárek *et al.* 2018).

Na análise do sulfentrazone remanescente aos 93 dias após a aplicação (DAA) (Tabela 6), foram observados os seguintes valores no solo arenoso para as doses de 250, 500 e 750 g ha⁻¹ nas camadas de 0 a 5 cm, 5 a 10 cm, 10 a 15 cm e 15 a 20 cm: 59,3 g ha⁻¹ (23,7%), 137,5 g ha⁻¹ (27,5%) e 206,5 g ha⁻¹ (27,5%). No solo argiloso, as mesmas doses e camadas resultaram em valores de 65,5 g ha⁻¹ (26,2%), 110,9 g ha⁻¹ (22,2%) e 185,1 g ha⁻¹ (24,7%). No solo arenoso, as perdas ultrapassaram 72,5% da dose aplicada em todas as camadas, enquanto no solo argiloso, as perdas foram superiores a 73,8%, independentemente da camada analisada. Vale ressaltar que, apesar de terem sido recuperadas pequenas porcentagens de sulfentrazone, com um mínimo de 27,5%, o residual do herbicida foi suficiente para causar injúrias e redução de matéria seca nas plantas bioindicadoras. Esses resultados indicam que o sulfentrazone apresentou um efeito residual significativo nos solos até 93 DAA.

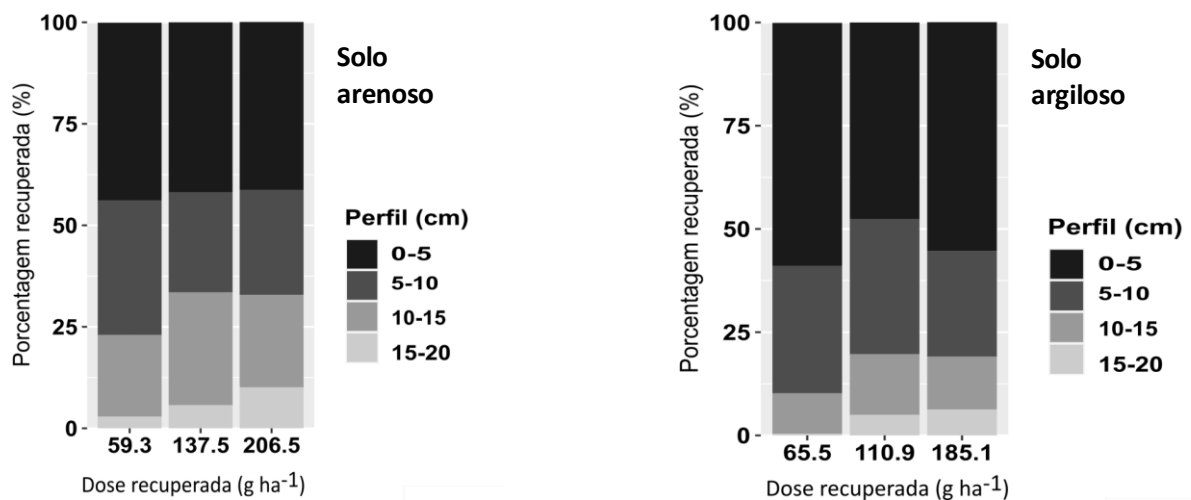
Tabela 6 - Concentração total de sulfentrazone recuperada e dissipada em solos arenoso e argiloso, utilizando as doses de 250, 500 e 750 g ha⁻¹ aos 93 DAA.

Descrição	Sulfentrazone					
	Solo arenoso			Solo argiloso		
	Dose aplicada (g ha ⁻¹)					
	250	500	750	250	500	750
Herbicida recuperado (g ha ⁻¹)	59,3	137,5	206,5	65,5	110,9	185,1
% Herbicida recuperado	23,7	27,5	27,5	26,2	22,2	24,7
Herbicida dissipado (g ha ⁻¹)	190,7	362,5	543,5	184,5	389,1	564,9
% Herbicida dissipado	76,3	72,5	72,5	73,8	77,8	75,3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

As concentrações de sulfentrazone foram distribuídas em todas as profundidades analisadas (0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm) nos solos arenoso e argiloso ao serem aplicadas as doses de 250, 500 e 750 g ha⁻¹. As camadas superiores de ambos os solos apresentaram as maiores concentrações de sulfentrazone. No geral, o herbicida foi bem distribuído nas camadas dos solos estudados (Figura 7). No entanto, no solo arenoso, as concentrações de sulfentrazone foram mais elevadas nas camadas inferiores (10-15 e 15-20 cm) em comparação com o solo argiloso, evidenciando a maior mobilidade do herbicida nesse tipo de solo.

Figura 7. Porcentagem de sulfentrazone recuperada em diferentes profundidades de solos arenoso (esquerda) e argiloso (direita), utilizando as doses de 250, 500 e 750 g ha⁻¹ aos 93 DAA.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O sulfentrazone apresenta um coeficiente de sorção moderado ($K_d < 1$) e alta solubilidade em água, variando conforme o pH (110 mg L⁻¹ em pH 6,0 e 1600 mg L⁻¹ em pH 7,5). Sua ligação ao solo é fraca ($K_{oc} = 43$), o que pode resultar em alta mobilidade em determinados tipos de solo (SHANER, 2012). Estudos indicam que a lixiviação do sulfentrazone está fortemente relacionada às propriedades químicas e físicas do solo, como os níveis de argila, areia e matéria orgânica. Em solos com maior teor de areia, o sulfentrazone foi distribuído uniformemente ao longo do perfil do solo (PASSOS *et al.*, 2015).

Estudos sobre a lixiviação do herbicida sulfentrazone em diversos solos brasileiros, como Alfisol Haplic, Argissolo e Entisol, revelaram a presença do composto até a profundidade de 30 cm (PASSOS *et al.*, 2015). Em outra pesquisa focada em um Entisol (Quartzipsammento)

e um Latossolo Vermelho-Amarelo, o sulfentrazone foi detectado nas profundidades de 45 cm e 35 cm, respectivamente (BRAGA *et al.*, 2016). Além disso, ao investigar os efeitos da transferência do sulfentrazone em beterrabas cultivadas após a cana-de-açúcar, constatou-se que o herbicida permaneceu ativo por 601 dias após a aplicação na menor dose testada (0,6 kg ha⁻¹), enquanto na dose de 1,2 kg ha⁻¹, a persistência se estende até 704 dias (BLANCO *et al.*, 2010).

A lixiviação do sulfentrazone está ligada à capacidade de retenção do herbicida pelo solo, geralmente se acumulando nas camadas superiores onde a retenção é alta (EI-NAHHAL E HAMDONA, 2017; TATARKOVÁ *et al.*, 2013). As principais fontes de retenção no solo, que envolvem mecanismos específicos para herbicidas ácidos, incluem os óxidos de Fe e Al presentes na fração argila, bem como aqueles associados à matéria orgânica do solo (ASSIS *et al.*, 2011; OLIVEIRA JR. *et al.*, 2013). Em solos com uma quantidade muito pequena desses compostos, o herbicida pode infiltrar-se em camadas mais profundas, atingir o lençol freático e se dispersar mais facilmente no ciclo da água.

Solos com maior capacidade de troca catiônica (CTC), como os argilosos (CTC de 5,19 cmolc dm⁻³), retêm mais sulfentrazone e têm menor lixiviação em comparação com solos arenosos (CTC de 4,35 cmolc dm⁻³). Estudos mostraram que o sulfentrazone permanece nas camadas superficiais de solos com maior CTC, reduzindo sua lixiviação (MADALÃO *et al.*, 2019; PASSOS *et al.*, 2015).

Neste estudo, foi analisada a presença de resíduos do herbicida sulfentrazone na camada de 10 a 20 cm. No entanto, outras pesquisas encontraram evidências de lixiviação desse composto em camadas mais profundas (BLANCO *et al.*, 2010; BRAGA *et al.*, 2016; PASSOS *et al.*, 2015).

A elevada persistência do sulfentrazone observada neste estudo (143 dias após a aplicação) destaca a necessidade de uma aplicação mais cuidadosa desse herbicida em solos brasileiros. Embora uma longa duração de efeito possa ser benéfica, muitas vezes uma única aplicação é suficiente para controlar as plantas daninhas durante o período necessário. Se o herbicida permanecer ativo por mais tempo, pode haver riscos de contaminação ambiental, especialmente da água, e aumento do risco de efeitos indesejados. A degradação do sulfentrazone em um Argissolo Vermelho-Amarelo mostrou uma meia-vida de 146,5 dias, confirmando sua alta persistência (ORTIZ MARTINEZ *et al.*, 2008; DAN *et al.*, 2010; KRUTZ *et al.*, 2005).

Além de sua persistência, o sulfentrazone pode impactar negativamente a microbiota do solo (VIVIAN *et al.*, 2006). Esse herbicida foi nocivo para a biomassa microbiana, a

colonização micorrízica e os microrganismos que solubilizam fosfato orgânico em solos cultivados com eucalipto (SILVA *et al.*, 2013). Adicionalmente, a aplicação de sulfentrazone pode prejudicar parcialmente a nodulação e a fixação de nitrogênio (ARRUDA *et al.*, 2001).

5 CONCLUSÃO

Conclui-se que o herbicida sulfentrazone, apresenta uma persistência significativa em diferentes tipos de solo, causando injúrias nas plantas bioindicadoras por um período de até 273 dias após a aplicação (DAA), especialmente na camada de 0-10 cm dos solos arenoso e argiloso. Na camada de 10-20 cm, essas injúrias foram registradas entre 63 e 93 DAA no solo arenoso, enquanto no solo argiloso os danos iniciaram aos 63 DAA e se mantiveram até o final do período avaliado.

A análise das quantidades de sulfentrazone remanescente aos 93 DAA indicou que, no solo arenoso, os valores recuperados nas doses de 250, 500 e 750 g ha⁻¹, distribuídas nas camadas de 0-20 cm, foram de 59,3 g ha⁻¹; 137,5 g ha⁻¹ e 206,5 g ha⁻¹, respectivamente.

No solo argiloso, os valores encontrados para as mesmas doses e camadas foram de 65,5 g ha⁻¹; 110,9 g ha⁻¹ e 185,1 g ha⁻¹, respectivamente. Esses dados evidenciam a necessidade de um manejo cauteloso do sulfentrazone, levando em consideração sua alta persistência no solo e o potencial de causar danos às plantas ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

- ARRUDA J. S. *et al.* Nodulação e fixação do nitrogênio em soja tratada com sulfentrazone. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 2, p. 325-30, 2001. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/SVDQYN7MCSmGhgrSN8jfs5F/?lang=pt#>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- ASSIS, E. C. *et al.* Sorption and desorption of picloram in soils under pastures with different attributes. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 825-833, out./dez. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/GvDkLMfYy5nbZZh6xmVz7xS/?lang=en>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- KEARNEY, P.C.; KAUFMAN, D.D. **Herbicides Chemistry: degradation, and mode of action**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1988.
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, Eduardo Dias. Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com soja e seu efeito em culturas sucedâneas. **Planta Daninha**, v. 23, p. 693-700, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/brf8bMJwDfrdSPJpQDwWpQB/?lang=pt>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- BLANCO, F. M. G.; VELINI, E. D.; BATISTA FILHO. A Persistência do herbicida sulfentrazone em solo cultivado com cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 71-75, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/B7yv5y7JkdFKkXrGVwxvvyh/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- BRAGA *et al.* Lixiviação de sulfentrazone em solos da região canavieira da região nordeste do Brasil. **Planta Daninha**, v. 34, p. 161-169, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/CsGYwkzCLbXqBw7P6rKXvYm/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- BRUM, Camila S.; FRANCO, André A.; SCORZA JÚNIOR, Rômulo P. Degradação do herbicida sulfentrazone em dois solos de Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 558-564, 2013.
- CORREIA, Núbia Maria. **Comportamento dos herbicidas no ambiente**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2018. (Embrapa Hortaliças. Documentos, 160). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1099141/1/DOC160.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- CONSTANTIN, JAMIL *et al.* **Buva: fundamentos e recomendações para manejo**. Curitiba: Omnipax, 2013.
- DAN, H. A. *et al.* Residual activity of herbicides used in soybean agriculture on grain sorghum crop succession. **Planta Daninha**, v. 28, p. 1087-1095, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/LJNYM8LVqcnnySwQGCTpwNF/?format=html&lang=en>. Acesso em: 17 dez. 2025.
- HESS, F. **Herbicide effects on plant structure, physiology, and biochemistry**. 1. Ed. Boca Raton: CRC Press, 1993.

DECHOUM, M. S.; ZILLER, S. R. Métodos para controle de plantas exóticas invasoras. **Biotemas**, Florianópolis, v. 26, n. 1, p. 69-77, mar. 2013. DOI: 10.5007/2175-7925.2013v26n1p69. Disponível em: <https://leimac.sites.ufsc.br/wp-content/uploads/2019/05/Dechoum-Ziller-2013-Métodos-para-controle-de-plantas-exóticas-SC.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2025.

DOLAPTSOGLU *et al.* Influence of Different Organic Amendments on the Degradation, Metabolism, and Adsorption of Terbutylazine. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 36, n. 1, p. 3-10, jan./fev. 2007. DOI: 10.2134/jeq2006.0388. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2006.0388>. Acesso em: 17 dez. 2025.

EL-NAHHAL, Yasser; HAMDONA, Nisreen. Adsorption, leaching and phytotoxicity of some herbicides as single and mixtures to some crops. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**, v. 22, p. 17-25, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1815385216000092>. Acesso em: 17 dez. 2025.

FAUSTINO, L. A. et al. Mobilidade do sulfentrazone em solos com diferentes características físicas e químicas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 795-802, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/hvwwQHGX3zskkn5JvCwFnH/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 dez. 2025.

FERRI, M. V. W. *et al.* Lixiviação do herbicida acetoclor em solo submetido à semeadura direta e ao preparo convencional. Pesticidas: **Revista Ecotoxicológica e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 13, n. 2, p. 147-156, 2003.

GONÇALVES, V. A. **Dinâmica do indaziflam em solos do brasil avaliada pelas técnicas da planta indicadora e cromatografia**. 2018. 65f. Tese (doutorado em fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

GREY, T. L. et al. Sulfentrazone adsorption and mobility as affected by soil and pH. **Weed Science**, Lawrence, v. 45, n. 5, p. 733-738, out. 1997. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/sulfentrazone-adsorption-and-mobility-as-affected-by-soil-and-ph/5068763E23D3698057494BB6BB1855F2>. Acesso em: 17 dez. 2025

ROSOLEN, D. L. et al. Sorption and mobility of sulfentrazone as a function of soil characteristics. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 5-12, jan. 2001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169772299000972?via%3Dihub>. Acesso em: 17 dez. 2025.

HATZIOS, K. K. Supplement to herbicide handbook. 7.ed. Lawrence: **Weed Science Society of America**, 1998. 104p.

FREITAS, M. A. M. et al. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo sob diferentes valores de pH. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 365-372, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/dJsKRPJd7ndx5pcvPc6RDBJ/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 17 dez. 2025.

JACOBS, J. M.; JACOBS, N. J. Oxidation of protoporphyrinogen to protoporphyrin, a step in chlorophyll and haem biosynthesis. **Biochemical Journal**, v.244, p.219-224, 1987.

KOČÁREK, M. *et al.* Effect of adjuvant on pendimethalin and dimethenamid-P behaviour in soil. **Journal of Hazardous Materials**, v. 354, n. 15, p. 266–274, 2018.

KRUTZ, L. J. *et al.* Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips: a review. **Weed Science**, v. 53, n. 3, p. 353-367, 2005.

LOURENCETTI, C.; MARCHI, M. R. R.; RIBEIRO, M. L. Influence of sugar cane vinasse on the sorption and degradation of herbicides in soil under controlled conditions. **Journal of Environmental Science and Health Part B**, v.47, p.949- 958, 2012.

LOUX, M.M.; LIEBL, R.A.; SLIFE, F.W. Availability and persistence of imazaquin, imazethapyr, and clomazone in soil. **Weed Science**, Champaign, v. 37, n.1, p. 259-267, 1989.

MADALÃO *at al.* Sorption and desorption of sulfentrazone in Brazilian soils. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 641-648, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/6LzjSsqZSjfmXStvnP9xLvQ/?lang=en>. Acesso em: 17 dez. 2025.

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

MARTINEZ, C. O. *et al.* The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone in a Brazilian typic hapludox soil. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 40, n. 10, p. 2597-2603, out. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706108002103>. Acesso em: 17 dez. 2025.

MELO, Christiane Augusta Diniz *et al.* Carryover de herbicidas em sistemas cultivados com olerícolas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 15, n. 1, p. 67-78, 2016.

MONQUERO, P. A. *et al.* Lixiviação e persistência dos herbicidas sulfentrazone e imazapic. **Planta daninha**, v. 28, p. 185-195, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/wPY4cfksQ5gvQjyqnHLQBKC/?lang=pt>. Acesso em: 17 dez. 2025.

MUELLER, T. C.; STECKEL, L. E.; RADOSEVICH, M. Effect of soil pH and previous Atrazine use history on Atrazine degradation in a Tennessee field soil. **Weed Science**, v.58, p.478-483, 2010. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/weed-science/article/abs/effect-of-soil-ph-and-previous-atrazine-use-history-on-atrazine-degradation-in-a-tennessee-field-soil/544FF063706E8FECFA268CE4920915BB>. Acesso em: 17 dez. 2025.

NASCIMENTO, Ronaldo F. *et al.* **Adsorção**: Aspectos teóricos e aplicações ambientais. 2ª edição. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020.

NIEKAMP, J.W.; JOHNSON, W.G. Weed management with sulfentrazone and flumioxazin in no-tillage soybean (*Glycine max*). **Crop Protection**, v.20, n.3, p.215-220, 2001.

OHMES, G. A.; HAYES, R. M.; MUELLER, T. C. Sulfentrazone dissipation in a Tennessee soil. **Weed Technology**, v.14, p.100-105, 2000.

OLIVEIRA JR., R. S. Mecanismo de ação de herbicidas. In: DE OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (Coord.). **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. Ompipax Curitiba, Brasil, p. 141-192, 2011.

OLIVEIRA JR, R. S. *et al.* Sorption and desorption of sulfentrazone in Brazilian soils. **Environ Sci Health B**, v. 48, n. 11, p. 909-914, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24007482/>. Acesso em: 17 dez. 2025.

OLIVEIRA M. F.; BRIGHENTI A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. In: Oliveira Júnior RS, Constantin J, Inoue MH, editores. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Ompipax; p.263-304, 2011.

ORTIZ MARTINEZ, C. *et al.* The effects of moisture and temperature on the degradation of sulfentrazone. **Geoderma**, v. 147, p. 56-62, 2008.

PASSOS, A. B. R. *et al.* Leaching of sulfentrazone in soils of reforestation in Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, p. 1211-1215, 2015.

PITELLI, ROBINSON ANTONIO. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série técnica IPEF**, v. 4, n. 12, p. 1-24, 1987.

PITELLI, ROBINSON ANTONIO; DURIGAN, J. C. Plantas daninhas no sistema plantio direto de culturas anuais. **R. Plantio Direto**, v. 4, n. 4, p. 13-18, 1998.

PRATA, F. *et al.* Glyphosate sorption and desorption in soils with different phosphorous levels. **Sci. Agric.**, v. 60, n. 1, p. 175-180, 2003.

REDDY, K. N.; LOCKE, M. A. Sulfentrazone sorption, desorption, and mineralization in soils from two tillage systems. **Weed Science**, v.46, p.494-500, 1998.

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. **Guia de herbicidas**. 5.ed. Londrina: 2005. 592 p.

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

ROSS, M.A.; LEMBI, C.A. **Applied weed science**. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 452 p.

SHANER, D. L. Field dissipation of sulfentrazone and pendimethalin in Colorado. **Weed Technology**, v. 26, n. 4, p. 633-637, 2012.

SILVA, A. A. *et al.* Herbicidas: Comportamento no solo. In: SILVA, A. A.; SILVA, J. F. (Eds.). **Tópicos em manejo de plantas daninhas**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2013. cap. 3, p. 189-248.

SZMIGIELSKI, A. M. *et al.* PASSOS, A. B. R. J. *et al.* Sorption and desorption of sulfentrazone in Brazilian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 43, n. 19, p. 2501-2512, 2012. DOI: 10.1080/00103624.2012.653025. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00103624.2012.653025>. Acesso em: 17 dez. 2025.

TATARKOVÁ, V. *et al.* Sorption-desorption of sulfentrazone in soils amended with rice straw biochar. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Amsterdam, v. 82, p. 22-28, ago. 2013. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0147651313000511>. Acesso em: 17 dez. 2025.

VIDAL, Ribas A.; FLECK, Nilson C. Análise do risco da ocorrência de biótipos de plantas daninhas resistentes aos herbicidas. **Planta Daninha**, v. 15, p. 152-161, 1997. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/hQhMQDPYDZPsvd4vXFNrLkr/?lang=pt>. Acesso em 17 dez. 2025.

VIVIAN, R. *et al.* Persistência de sulfentrazone em argissolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 741-750, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/q5vRMbQFdBd6JktxCnyQPP/?lang=pt>. Acesso em 17 dez. 2025.

WANG, W.; YE, Q.; DING, W.; HAN, A.; WANG, H.; LU, L.; GAN, J. Influence of soil factors on the dissipation of a new Pyrimidinyloxybenzoic herbicide ZJ0273. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.58, p.3062-3067, 2010. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20148513/>. Acesso em 17 dez. 2025.

WEBER, Jerome. Sorption and mobility of sulfentrazone as a function of soil characteristics. **American Chemical Society**, Washington, 2000. p. 69-81. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4615-8464-3_5. Acesso em: 17 dez. 2025.

WEBER, J. B.; MILLER, C. T. Organic chemical movement over and through soil. **American Chemical Society**, Washington, v. 22, p. 305-334, 1989. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.2136/sssaspecpub22>. Acesso em: 17 dez. 2025.

ZIMDHAL, R.L. **Fundamentals of weed science**. San Diego, CA: Academic Press, Inc. 1993. 450 p.