

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GILCINIERI RIBEIRO MARQUES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DO HERBICIDA 2,4-D EM
COLUNAS DE SOLO ATRAVÉS DE BIOENSAIOS COM *Cucumis sativus***

**Caçapava do Sul
2021**

GILCINIERI RIBEIRO MARQUES

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DO HERBICIDA 2,4-D EM
COLUNAS DE SOLO ATRAVÉS DE BIOENSAIOS COM *Cucumis sativus***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Rafael Matias Feltrin

**Caçapava do Sul
2021**



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

GILCINIERI RIBEIRO MARQUES

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE LIXIVIAÇÃO DO HERBICIDA 2,4-D EM COLUNAS DE SOLO ATRAVÉS DE BIOENSAIOS COM *Cucumis sativus*

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 06 de maio de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael Matias Feltrin
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Ricardo Machado Ellensohn
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Thiago Henrique Lugokenski
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **THIAGO HENRIQUE LUGOKENSKI, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/05/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RICARDO MACHADO ELLENSOHN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/05/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **RAFAEL MATIAS FELTRIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/05/2021, às 18:26, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0519320** e o código CRC **0B1B6E94**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Aos meus pais, Deloi e Honorina que me incentivaram, apoiaram e me deram forças em todos os momentos e em todos meus projetos e que compreenderam a minha ausência não somente enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho, mas em todo o período da graduação. A minha irmã, Neidiani, minha sobrinha, Priscilla e meu Cunhado, Matheus que estiveram mais próximos de mim durante essa etapa da minha vida e que me incentivaram e me ajudaram em todos os momentos. Parte das conquistas desse período foram graças ao apoio de vocês e são todas por vocês.

Às primas Gabriela e Marina e aos meus amigos Thayza, Aline e Guilherme que mesmo nos vendo tão pouco sempre me escutam e me incentivam. Em especial ao Geovani que esteve comigo durante a realização do trabalho de conclusão, que me auxiliou na coleta de solo e esteve do meu lado para alcançar o mate.

Às amigas feitas ao longo desses anos, de modo especial a Raphaella, a Gabriele e Fernanda que me deram apoio e ombro amigo e estiveram juntas comigo na maior parte da graduação. Agradeço de modo especial a Tia Valderez e ao tio Márcio, por terem sido meu teto no início do curso, por terem me recebido em sua casa em Caçapava do Sul, terem compartilhado comigo os dias de felicidade e estudo.

Agradeço de modo especial a Cooperativa Tritícola Caçapavana, sobretudo ao Ederson, por terem me cedido o herbicida para a realização deste trabalho.

Agradeço de modo especial direção da Escola Técnica Estadual Dr. Rubens da Rosa Guedes e ao Prof. Graziel Druk Maia, por terem fornecido espaço para a realização deste trabalho e realizado a pulverização do herbicida.

Agradeço de modo especial ao meu orientador, Prof.º. Dr.º. Rafael Matias Feltrin, pelas orientações, paciência e ajuda oferecida ao longo deste trabalho e nos demais projetos que trabalhamos juntos.

Agradeço ao Grupo de Estudos em Recursos Hídricos e Solos, por ter me dado a oportunidade de desenvolver e participar de projetos de ensino, pesquisa e extensão.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, embora não nomeados, me apoiaram em distintos momentos e, por suas presenças afetivas e inesquecíveis, o meu reconhecimento e carinho, muito obrigado!

RESUMO

A constante expansão da agricultura, principalmente a monocultura intensificada pelo desenvolvimento de sementes transgênicas acentuou o uso de agrotóxicos. No Brasil destaca-se a crescente utilização e liberação de novos agrotóxicos nos últimos anos, sendo o glifosato e o ácido 2,4-D os herbicidas mais comercializados no país. Esses fatos vêm gerando preocupações, sobretudo em relação à dinâmica e persistência dos agrotóxicos no solo. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o potencial de lixiviação do herbicida ácido 2,4-Diclorofenoxiacético em colunas de Neossolo Litólico utilizando *Cucumis sativus* (pepino) como bioindicador. Para o estudo foi adotado o esquema fatorial 3 x 4 x 2, com lâminas de irrigação de 0, 40, 80 mm e profundidades de monitoramento de 0 - 0,10; 0,10 - 0,20; 0,20 - 0,30 e 0,30 - 0,40 m, na presença e ausência do herbicida, em triplicatas, totalizando 18 colunas e 72 parcelas experimentais. A avaliação da lixiviação foi realizada por meio das análises de percentual e índice de velocidade de emergência de plântulas do bioindicador. Os resultados demonstram que a emergência do pepino foi maior nos tratamentos sem o herbicida 2,4-D, independente das variações de lâminas de chuva simulada e profundidades das colunas. Na presença do herbicida a emergência do bioindicador aumentou com o incremento das lâminas de chuva simuladas. Considera-se que existe potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D até os 40 cm de profundidade em Neossolo Litólico.

Palavras-chave: Dinâmica de herbicida no solo. Fitotoxicidade de herbicida. Simulador de chuva.

ABSTRACT

The constant expansion of agriculture, especially monoculture, intensified by the development of transgenic seeds, has increased the use of pesticides. In Brazil, the increasing use and release of new pesticides in recent years stands out, with glyphosate and 2,4-D being the most commercialized herbicides in the country. These facts have been generating concerns, especially in relation to the dynamics and persistence of pesticides in soil. In this context, the present study aims to evaluate the leaching potential of the herbicide 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid in columns of litholic neosol using *Cucumis sativus* (cucumber) as bioindicator. For the study the factorial scheme 3 x 4 x 2 was adopted, with irrigation sheets of 0, 40, 80 mm and monitoring depths of 0 - 0.10; 0.10 - 0.20; 0.20 - 0.30 and 0.30 - 0.40 m, in the presence and absence of the herbicide, in triplicates, totalizing 18 columns and 72 experimental plots. The evaluation of the leaching was carried out by means of the analysis of percentage and speed index of emergence of seedlings of the bioindicator. The results show that the emergence of the cucumber was higher in the treatments without the herbicide 2,4-D, independent of the variations of simulated rainfall and depths of the columns. In the presence of the herbicide, the emergence of the bioindicator increased with the increase of the simulated rainfall. It is considered that there is potential for leaching of the herbicide 2,4-D up to 40 cm depth in Litholic Neosols.

Keywords: Dynamics of herbicide in the soil. Herbicide phytotoxicity. Rain simulator.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Total de Agrotóxicos Componentes e Afins Registrados por ano no Brasil.	16
Figura 2 - Venda total de 2,4-D no Brasil de 2009-2019, em toneladas de ingrediente ativo.	19
Figura 3 - Estrutura do simulador de chuvas construído com materiais de administração de soro fisiológico.	25
Figura 4 – Mapa de identificação dos pontos de coleta de solo.	28
Figura 5 – Coleta e preparo do solo: a) coleta em campo; b) armazenamento e identificação; c) secagem do solo.....	29
Figura 6 – Colunas de solo: a) tubos já cortados e sendo lixados; b)colunas montadas; c) colunas com revestimento em parafina.	30
Figura 7 – Preenchimento das colunas com solo (a); pesagem das colunas (b).	31
Figura 8 - Pulverização do herbicida 2,4-D nas colunas de solo.....	32
Figura 9 – Simulação de chuva: a; b) construção do simulador com equipo de administração de soro fisiológico; c) sistema em funcionamento.	33
Figura 10 - Preparação das unidades experimentais: seccionamento da coluna (a), separação do solo dentro da coluna (b), etiquetagem e acomodação dos anéis (c).....	33
Figura 11 – Semeadura do bioindicador: aberturas nas unidades experimentais (a), semeadura das sementes de pepino.....	34
Figura 12 – Unidades experimentais que receberam o herbicida 2,4-D, durante os 11 DAS.	35
Figura 13 – Unidades experimentais que NÃO receberam herbicida, durante os 11 DAS.	36
Figura 14 – Fase de emergência de plântula.	37
Figura 15 – Interação do Percentual de Emergência do pepino com as profundidades das colunas nos tratamentos com herbicida 2,4-D e sem (testemunha) e lâminas de chuva simulada: a) 80 mm; b) 40 mm; c) 0 mm.	40
Figura 16 – Interação do Índice de Velocidade de Emergência do pepino com a profundidade das colunas na presença e ausência do herbicida 2,4-D, sem chuva simulada e lâminas de chuva simulada: a) 80 mm; b) 40 mm; c) 0 mm.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dosagens e volume de calda recomendados e definidos para o experimento.....	31
Tabela 2 - Arranjo estatístico da análise de variância.....	38
Tabela 3 – Características químicas do Neossolo Litólico.....	41
Tabela 4 – Índice de velocidade de emergência (IVE) das unidades experimentais com o herbicida 2,4-D.....	41
Tabela 5 – Índice de velocidade de emergência (IVE) das unidades experimentais sem o herbicida 2,4-D.....	42
Tabela 6 – Índice de velocidade de emergência (IVE) de ambos tratamentos: com e sem o herbicida 2,4-D.....	42
Tabela 7 – Características físicas do Neossolo Litólico.....	44
Tabela 8 – Dados analíticos do Neossolo Litólico Distrófico típico da Unidade Guaritas em Caçapava do Sul, RS.....	45

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1.	Justificativa	13
1.2.	Objetivo	14
1.2.1.	Objetivo Geral	14
1.2.2.	Objetivos Específicos	14
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1.	Expansão da Agricultura e do Uso de Agrotóxicos	14
2.1.1.	herbicidas.....	16
2.2.	Ácido 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D)	17
2.2.1.	Histórico e Usos	18
2.2.2.	Formulações do Herbicida 2,4-D.....	20
2.2.3.	Capacidade de Seleção e Fitotoxicidade em Plantas	20
2.2.4.	Comportamento no Solo.....	21
2.3.	Transporte de Herbicida no Solo	23
2.3.1.	Lixiviação	23
2.4.	Simuladores de Chuva	24
2.5.	Colunas de Solo.....	25
2.6.	Uso de Bioindicadores na Avaliação do Potencial de Lixiviação de Herbicidas...	26
2.7.	Neossolos.....	27
3.	METODOLOGIA.....	28

3.1. Área e Procedimento de Coleta do Solo.....	28
3.2. Estudo de Lixiviação	29
3.2.1. Construção das Colunas de Solo	30
3.2.2. Pulverização do Herbicida.....	31
3.2.2.1. Simulação de Chuva.....	32
3.2.3. Unidades Experimentais	33
3.2.4. Semeadura do Bioindicador.....	34
3.2.5. Índice de Velocidade e Percentual de Emergência de Plântula.....	37
3.3. Análise Estatística dos Dados	38
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1. Emergência de Plântula do Bioindicador	39
5. CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	48
APÊNDICES	57

1. INTRODUÇÃO

O crescimento populacional no mundo tem provocado o aumento da demanda externa e interna dos países por alimentos do setor primário, motivando assim, a expansão das áreas de cultivo agrícola e principalmente a crescente tendência à monocultura e uso de agrotóxicos (FIRMINO; DA FONSECA, 2008).

No Brasil, essas questões têm originado preocupações, especialmente em relação aos agrotóxicos (pesticidas, herbicidas e fungicidas), em virtude da crescente liberação, uso e possibilidade de contaminação dos corpos hídricos. Frequentemente resíduos de pesticidas são encontrados em solos e águas superficiais e subterrâneas, consequência do aumento e contínuo uso dessas substâncias na agricultura (GÓMEZ; MARCELO, 2020).

A liberação de registros de agrotóxicos, componentes e afins tem acelerado nos últimos cinco anos, em 2020 bateu o recorde com 493 novos registros de ingredientes ativos, componentes e afins aprovados (MAPA, 2020). Conforme os relatórios de comercialização de agrotóxicos do IBAMA (2020), o Brasil teve a venda interna em 2019 de 620.537,98 toneladas de ingrediente ativo, sendo os maiores consumidores os estados de Mato Grosso, São Paulo e Rio Grande do Sul. De acordo com a mesma fonte os agrotóxicos mais comercializados foram o Glifosato, 2,4-D, Mancozebe, Acefato, Atrazina, Clorotalonil, Dicloreto de Paraquate, Malationa, Enxofre e Clorpirifós.

O herbicida 2,4-D (ácido 2,4-Diclorofenoxiacético) é amplamente utilizado para dessecação de plantas daninhas principalmente na pré- semeadura da soja, tendo capacidade de seleção de plantas com folhas estreitas e gerando maior fitotoxicidade em espécies com folhas largas (PERES-OLIVEIRA, 2017).

A utilização de herbicidas na agricultura tem gerado preocupações quanto ao impacto ambiental da degradação da qualidade de águas subterrâneas e superficiais e do solo, onde pode acumular elementos minerais e reduzir o grau de fertilidade (SOARES; PORTO, 2007). Sendo assim, são imprescindíveis estudos laboratoriais para prever o potencial de lixiviação dos herbicidas, de modo que a movimentação destes resíduos através do perfil do solo pode causar a contaminação dos ecossistemas aquáticos e solo, resultando na perda de terras e recursos hídricos utilizados pelo homem (US-EPA, 1982).

Para Grover (1977) os estudos laboratoriais utilizando colunas de solo fornecem muitas informações sobre os fatores que influenciam o movimento de pesticidas no solo. Esses estudos em colunas de solo são importantes para obtenção de parâmetros quantitativos que são fundamentais à simulação do movimento de contaminantes através do solo ou de outro

material granular, observação dos efeitos das reações química e biológicas no caminho dos contaminantes, durante o transporte em meio poroso, obtenção de curvas de lixiviação, análise das relações de competitividade entre diferentes íons contaminantes submetidos no mesmo corpo de prova, compatibilidade do solo com os contaminantes e avaliação do comportamento de contaminantes em aquíferos regionais (LEITE, 2000).

Devido ao amplo uso do herbicida 2,4-D e os possíveis potenciais riscos ambientais, torna-se necessário o entendimento do comportamento nos diferentes tipos de solo e possível contaminação. Entre os 13 grandes grupos de solos identificados pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS, 2018) foram encontrados somente estudos do potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D em Latossolos. De acordo com o Banco de Dados de informações Ambientais (BDiA) os três maiores grandes grupos de solo do Brasil são os Latossolos ocupando 32,96% da área, Argissolos (28,10%) e Neossolos (13,38%) (IBGE, 2020).

Nesse contexto, o presente trabalho busca estudar o potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D em colunas preenchidas com Neossolo Litólico, sob chuva simulada e utilização de *Cucumis sativus* (pepino) como bioindicador.

1.1. Justificativa

Com o aumento constante do uso, síntese e registros de novas formulações de herbicidas surge a necessidade de identificar as propriedades físicas e químicas do solo e dos herbicidas, os métodos de aplicação, as condições climáticas que interferem na sua atividade, o comportamento no solo e na água e as propriedades bióticas do meio ambiente.

Além disso, deve-se ter entendimento da relação de causa e efeito do herbicida e da contaminação do ambiente, que está comumente relacionada à presença do composto no solo, tornando fundamental que os fatores que influenciam o seu comportamento sejam plenamente compreendidos.

O herbicida ácido 2,4-Diclorofenoxiacético é largamente utilizado para o controle de plantas daninhas, principalmente dicotiledôneas, no Brasil e no mundo, desde sua formulação nos anos 40. Porém, observa-se a existência de poucos estudos no Brasil sobre a lixiviação deste herbicida, necessitando de mais detalhamento e conhecimento sobre o comportamento em diferentes tipos de solos, dosagens adequadas para evitar a lixiviação para as camadas mais profundas do solo e atingir o lençol freático.

Essa lacuna no conhecimento refere-se a uma das principais fontes das contaminações do solo, recursos hídricos e seres vivos, principalmente de lençóis freáticos, justificando-se assim, a busca de respostas que ajudem a compreender o comportamento do herbicida 2,4-Diclorofenoxiacético no solo.

1.2. Objetivo

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de lixiviação do herbicida ácido 2,4-Diclorofenoxiacético em colunas preenchidas com Neossolo Litólico.

1.2.2. Objetivos específicos

Com o propósito de alcançar o objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Verificar a influência de diferentes lâminas de chuva simulada sob o comportamento do herbicida nas colunas de solo;
- Analisar a emergência do bioindicador na presença de 2,4-D e ao longo das camadas das colunas de solo;
- Identificar como as propriedades físico-químicas do solo e do herbicida, ambas encontradas na bibliografia, influenciam na lixiviação do 2,4-D;

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Expansão da agricultura e do uso de agrotóxicos

Espécies de trigo começaram a ser cultivadas entre 10.000 e 8.000 a.C quando ocorreu a chamada Revolução Neolítica, primeira revolução da agricultura, observada no Oriente Médio, Paquistão e Índia Ocidental, neste momento houve substituição da caça e coleta pela agricultura e assentamento (NENE, 2012). Apesar das atividades agrícolas serem desenvolvidas a muitos anos, o uso de agrotóxicos na agricultura é mais recente e teve expansão após inúmeras políticas e pesquisas para produzir sementes capazes de responder aos agrotóxicos em sistemas de monocultura, com a justificativa de acabar com a fome no mundo, porém o consumo aumentou ainda mais após o desenvolvimento de sementes transgênicas (LONDRES, 2012).

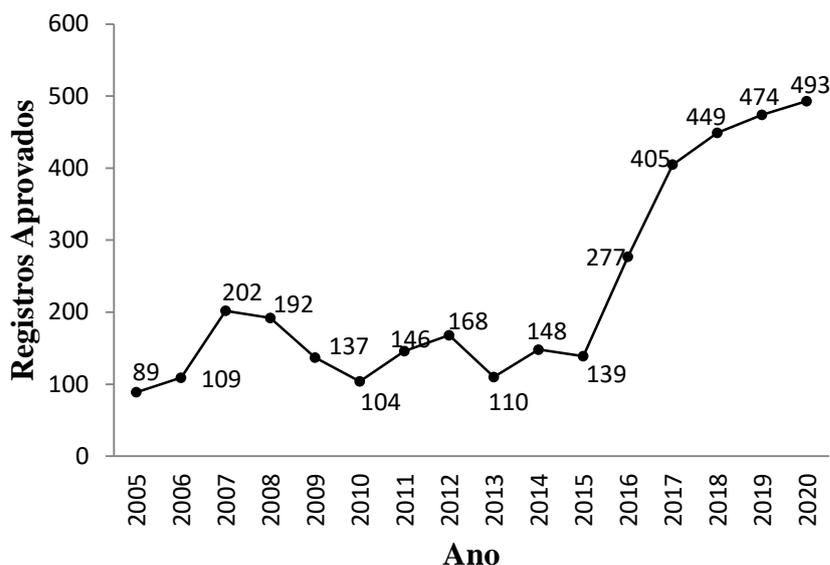
Os agrotóxicos são substâncias químicas, naturais ou sintéticas, destinadas para matar, controlar ou combater pragas que atacam, lesam ou transmitem enfermidades para plantas, animais ou ao homem, são divididos em herbicidas (destinado a plantas concorrentes/daninha), fungicidas (destinado a doenças fúngicas) e inseticidas (destinado a insetos que são considerados pragas) (ANDRADE, 1995). Porém, foram desenvolvidos para utilização como arma química de guerra durante as primeiras décadas do século XX, somente em 1970 durante as ditaduras militares nos países latino-americanos começaram a ser utilizados na agricultura. No Brasil, em 1975 ocorreu aumento da utilização desses produtos quando foi criado o Plano Nacional de Defensivos Agrícola, condicionando o crédito rural ao uso intensivo de agrotóxicos, tornando-se o maior consumidor de agrotóxicos do mundo em 2008 e mantém até o atual momento (DOS SANTOS BROCHARDT; PAULINO, 2019).

A venda de pesticidas em muitos países Europeus durante quinze anos (2004-2019) se manteve constante, porém na Polônia esse número triplicou e na Dinamarca ocorreu diminuição pela metade entre 2013 e 2015 após aumento nos impostos sobre pesticidas (AGRICULTURE ATLAS, 2019). De acordo com a mesma fonte, os números mais recentes da Europa mostram que foram utilizadas 391.000 toneladas de ingredientes ativos (i.a), onde 80% referem-se a fungicidas e herbicidas.

Conforme os relatórios de comercialização de agrotóxicos do IBAMA (2020), atualmente o Brasil é o maior consumidor de agrotóxicos do mundo, a venda interna no país em 2019 foi 602.537,98 toneladas de ingrediente ativo, o estado do Rio Grande do Sul teve a venda de 74.291,50 toneladas de i.a, ficando abaixo apenas do Mato Grosso e São Paulo. Os agrotóxicos mais comercializados nesse período foram: o Glifosato; 2,4-D; Mancozebe; Acefato; Atrazina; Clorotalonil; Dicloreto de Paraquate; Malationa; Enxofre e Clorpirifós (IBAMA, 2020).

O país também se destaca com a crescente liberação de registros de agrotóxicos, componentes e afins nos últimos cinco anos (Figura 1), com recorde em 2020, quando foram aprovados 493 novos registros (MAPA, 2021).

Figura 1 - Total de Agrotóxicos Componentes e Afins Registrados por ano no Brasil.



Fonte: Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento - MAPA (2021).

O Brasil é considerado o maior consumidor de agrotóxicos banidos de outros países, dentre os 50 mais utilizados no país, 22 são proibidos na União Europeia, mesmo que muitas pesquisas mostrem os efeitos negativos da exposição a essas substâncias (MELLO, 2020).

Souza e Folgado (2016) consideram que o primeiro impacto do consumo de agrotóxicos é para a saúde da população, pois resíduos destes produtos são encontrados nos alimentos e o segundo impacto é para o ambiente, onde 1 bilhão de litros de agrotóxicos são diluídos 1:100 em água, produzindo cem bilhões de litros de calda tóxica por ano, as quais são pulverizadas nas lavouras.

2.1.1. Herbicidas

Herbicida é um produto fitossanitário, comumente produzido à base de hormônio vegetal, utilizado para eliminar plantas indesejáveis (plantas daninhas) de áreas destinadas ao cultivo (ARIAS; MORA; ROMERO, 2019). As plantas daninhas são todas e quaisquer plantas que ocorrem em áreas onde não são desejadas, principalmente em áreas de cultivos agrícolas onde podem competir por água, luz, nutrientes e espaço (BRIGHENTI; DE OLIVEIRA, 2011).

No mundo as lavouras são comumente afetadas por plantas daninha, justificando-se assim o crescente uso de herbicidas, sendo considerados atualmente fundamentais na

agricultura, com mais de 12 famílias de compostos químicos sendo utilizados para erradicar essas ervas (ARIAS; MORA; ROMERO, 2019).

Porém, os herbicidas são disseminados não apenas no sistema de cultivo no qual foram aplicados, mas também entra em outros nichos ambientais, como o solo e água (GÓMEZ; MARCELO, 2020). Nesse sentido De Oliveira Jr e Inoue (2011), consideram que a eficiência de um herbicida está relacionada não somente a sua capacidade de controlar determinada planta daninhas, mas também ao baixo potencial de lixiviação e persistência no solo, pois grande parte das sementes dessas ervas estão nos primeiros 5 cm de profundidade do solo.

Dentre os princípios ativos de herbicidas utilizados no Brasil destacam-se os herbicidas Glifosato e o ácido 2,4-D, sendo os mais frequentes na cultura da soja, com cerca de 5,5 e 1 litros por hectare (l/ha), respectivamente (PIGNATI et al., 2017). De acordo com levantamento dos herbicidas registrados no Brasil realizado por Oliveira et al. (2020) junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, existem 779 herbicidas registrados e comercializados no país, sem contar as pré-misturas do mesmo ingrediente ativo.

A lei vigente no Brasil com disposições sobre herbicidas é a Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989, conhecida como a “lei do agrotóxico”, que classifica os agrotóxicos e afins quanto à toxicidade, determina a embalagem e os dados obrigatórios dos rótulos, além de dar orientações quanto ao transporte, armazenamento e comercialização, registro, controle, inspeção e fiscalização (BRASIL, 1989). A legislação brasileira de agrotóxicos é questionada por Garcia, Bussacos e Fischer (2005), segundo eles devem constar na legislação métodos de controle e de gerenciamento dos riscos causados pelo uso de agrotóxicos, ainda consideram que não adianta classificar essas substâncias dentre classes toxicológicas se elas são recomendadas, comercializadas e utilizadas do mesmo modo e para qualquer usuário.

2.2. Ácido 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D)

O ácido 2,4-Diclorofenoxiacético ($C_8H_6Cl_2O_3$), é um herbicida do grupo químico ácido ariloxialcanóico, classe toxicológica I (extremamente tóxico), possui importância toxicológica, podendo apresentar os limites máximos de dioxinas de 0,01 ppm e de fenóis livres de 3,0 g/kg (ANVISA, 2019).

O Perfil Ambiental do herbicida ácido 2,4-D elaborado pelo IBAMA (2019), reporta a solubilidade em água (S) de 484,00 mg/L (20 °C) e em água com pH 2,8 solubilidade de 351,9 mg/L (20 °C). A solubilidade em água (S) é a concentração máxima de um produto que pode ser dissolvida em água pura a uma determinada temperatura, ou seja, determina a dose

de herbicida que é cedida na solução do solo e pode ser absorvida pelas sementes e raízes das plantas (CHRISTOFFOLETI et al., 2009).

Considera-se o 2,4-D um ácido orgânico forte, com dissociação em soluções aquosas, formando o íon dimetilamônia e conjugados de base 2,4-D, com constante de dissociação (pKa) igual a 3,29 a 20 °C (IBAMA, 2019). Essas constantes de ionização ácido/base, pKa e pKb caracterizam a predisposição de ionização em determinado pH, portanto, quanto maior o pKa de um herbicida, mais fraca é sua força ácida, então menor a possibilidade do herbicida ficar ácido (aniônico) e quanto menor o pKa, menor sua força básica, ou seja, menor a probabilidade do herbicida ficar básico (catiônico) (CHRISTOFFOLETI et al., 2009).

Em condições naturais do ambiente, o herbicida 2,4-D e algumas de suas formulações são sólidos cristalinos e solúveis em água, também altamente seletivo e pós-emergente (AMARANTE JUNIOR et al, 2002). É aplicado nas folhas e desloca-se até os pontos de crescimento da planta, ou seja, é translocado via floema, caracterizando-se assim, como um herbicida sistêmico (MARCHI; MARCHI; GUIMARÃES, 2008).

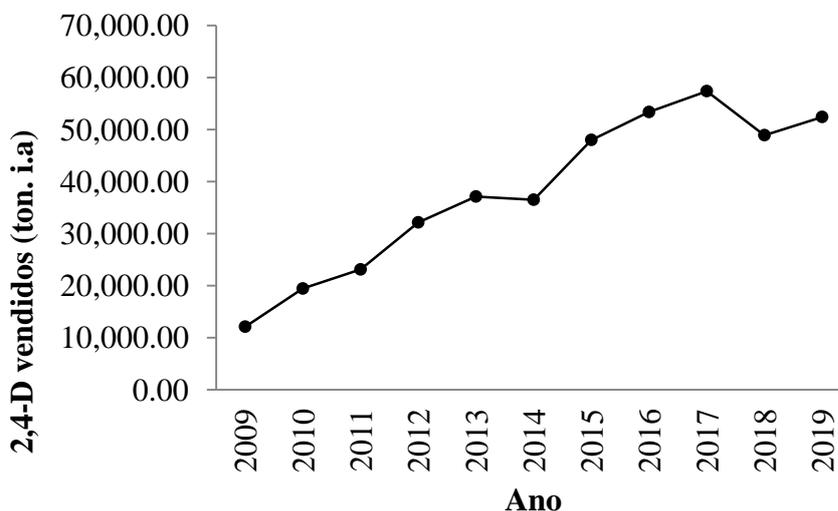
2.2.1. Histórico e usos

Durante a Guerra do Vietnã iniciada em 1955, as forças armadas dos Estados Unidos em apoio ao Vietnã do Sul desenvolveram novas armas, dentre elas o agente laranja, desenvolvido a partir de agrotóxicos, com o objetivo de desfolhar florestas e encontrar os esconderijos do exército norte-vietnamita (DOS SANTOS FERREIRA, 2016). Empresas do setor de agroquímicos que se fundiram originando a Syngenta foram responsáveis pela sinterização do 2,4-D, o qual foi usado como composto do agente laranja durante a Guerra do Vietnã (BUENO; DE OLIVEIRA, 2014). O uso do 2,4-D após seu desenvolvimento durante o processo químico-biológico na Segunda Guerra Mundial e continuado no Vietnã devastou um grande número de organismos além da vegetação a qual estava designado (WARNOCK; LEWIS, 1982).

O uso do herbicida 2,4-D e de suas formulações é liberado no Brasil, conforme estabelece a Resolução – RDC nº284, de 21 de maio de 2019 (BRASIL, 2019). Dados atuais mostram que o herbicida 2,4-D é um dos ingredientes ativos mais vendidos no Brasil, desde 2013 é o segundo no ranking, em 2017 atingiu a marca de 57.389,35 (ton. i.a) e em 2019 foram vendidas 52.426,96 (ton. i.a), representando nesse último ano aproximadamente 8,5% das vendas totais de ingredientes ativos deste período, esse crescimento é mostrado na Figura

2 (IBAMA 2020). Segundo a mesma fonte o Rio Grande do Sul foi o quarto maior consumidor no ano de 2019 com 5.789,55 toneladas.

Figura 2 - Venda total de 2,4-D no Brasil de 2009-2019, em toneladas de ingrediente ativo.



Fonte: Relatórios de vendas de agrotóxicos do IBAMA (2017; 2018; 2019; 2020).

O uso e aplicação de herbicidas que continham em suas formulações o ácido 2,4-D foram proibidos em todo o estado do Rio Grande do Sul durante o mês de dezembro de 2019, em virtude dos prejuízos gerados as culturas de maçãs, uvas, pêssego e hortaliças, cultivadas nas áreas vizinhas de onde foi aplicado o herbicida (SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DESENVOLVIMENTO RURAL, 2019).

A manutenção do uso do herbicida 2,4-D e de suas formulações em âmbito federal é estabelecida na Resolução – RDC n° 284, de 21 de maio de 2019, que também determina medidas de mitigação de riscos a saúde e considera a falta de provas dos efeitos deletérios a saúde humana e animal a justificativa para a manutenção do uso (BRASIL, 2019).

Conforme o Portal do Conteúdo Agropecuário o herbicida 2,4-D é utilizado no Brasil nas culturas da soja (pré-plantio), milho, cana-de-açúcar, café, trigo, aveia, centeio, arroz e pastagem formada para controlar ervas daninhas, como por exemplo, corda-de-viola ou corriola, leiteira ou amendoim-bravo, guanxuma, poaia, serralha, erva-quente, trapoeraba, entre outras. De acordo com a mesma fonte existem vários produtos comerciais registrados no Brasil que possuem 2,4-D em suas formulações, sendo os mais conhecidos o U-46 Fluid, AMINOL 806 e DMA 806.

2.2.2. Formulações do herbicida 2,4-D

O herbicida 2,4-D e suas formulações são encontrados em aproximadamente 660 produtos agrícolas e produtos domésticos como único princípio ativo ou combinado com outros ingredientes ativos, sendo formulado principalmente como um sal de amina em solução aquosa ou como éster em emulsão (EPA, 2005). As formulações de sais de amina do 2,4-D (principalmente sal de dimetilamina) são mais solúveis em água em relação aos ácidos e derivados de éster que são dissolvidos rapidamente em solventes orgânicos (SINGH, 2020).

As formulações do ácido 2,4-D comercializadas no Brasil são: 2,4-D-dimetilamina ($C_{10}H_{13}Cl_2NO_3$), 2,4-D-trietanolamina ($C_{14}H_{21}Cl_2NO_6$), 2,4-D-triisopropanolamina ($C_{17}H_{27}Cl_2NO_6$), 2,4-D Sal de Colina ($C_8H_5Cl_2O_3 \cdot C_5H_{14}NO$) (ANVISA, 2019). Recentemente foi excluído o uso da forma éster butílico do 2,4-D (BRASIL, 2019).

2.2.3. Capacidade de seleção e fitotoxicidade em plantas

A seletividade do herbicida refere-se à determinação de quais espécies são mais sensíveis ou menos sensíveis, ou seja, quais plantas são mais controladas por determinado herbicida, o qual pode ser classificado como seletivo (ação severa sobre a planta daninha sem agredir a planta de cultivo) ou não seletivo (ação severa sobre maior parte das plantas) (DE OLIVEIRA JR; INOUE, 2011).

O herbicida 2,4-D é seletivo, podendo ser aplicado no período de emergência, antes da planta apresentar botões, na dormência em determinados plantios, no período foliar, de pós-emergência, pré-emergência, pré-colheita e pré-plantio (EPA, 2005). Sendo na agricultura seu principal uso como herbicida no controle de plantas daninhas de folhas largas, em concentrações adequadas, manifesta propriedades de fitorregulador de crescimento e alterações na absorção de nutrientes por algumas espécies de plantas (OKUYAMA; DA SILVA, 1983).

Acredita-se que o 2,4-D aumente a plasticidade da parede celular, biossíntese de proteínas e produção de etileno, resultando em descontrole da divisão celular e crescimento anormal que danifica o tecido vascular (EPA, 2005). Porém, os mecanismos detalhados de como o herbicida 2,4-D mata plantas de folha larga sem afetar as monocotiledôneas ainda não são totalmente compreendidos (SONG, 2014).

Franceschi et al.(2015) observaram alguns sintomas de fitointoxicação em plantas jovens de soja cultivadas em diferentes profundidades, entre elas destacaram-se a epinastia das

folhas, o retorcimento do caule e fortes alterações na altura especialmente nas maiores doses de 2,4-D estudadas (0,5 e 1%) e nas menores profundidades (0, 8 e 16 cm).

Os principais danos visuais causados pelo 2,4-D em estudo realizado por Pinheiro (2020) utilizando a soja como bioindicador foi o encarquilhamento das folhas, epinastia dos pecíolos, engrossamento e rachaduras no ramo principal em todas as doses aplicadas, sendo que na maior dose (684,0 g i.a ha⁻¹) além dessas injúrias as plantas apresentaram redução do porte e em seguida morreram.

2.2.4. Comportamento no solo

O comportamento dos herbicidas no solo é influenciado pelas características físico-químicas do próprio herbicida, físico-química e biológicas do solo e pelas condições ambientais, porém cada herbicida possui características distintas, podendo ser variáveis entre as moléculas de um mesmo grupo químico (CHRISTOFFOLETI et al., 2009). Os principais fatores que interferem no comportamento dos herbicidas no solo são: mobilidade, adsorção e decomposição (VIEIRA et al., 1999).

A mobilidade do 2,4-D em Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Roxo Distrófilo, Areia Quartzosa e Latossolo Roxo varia de muito móvel a altamente móvel, já em Gleissolo Húmico varia de pouco móvel a medianamente móvel (IBAMA, 2019).

A adsorção do 2,4-D em solo mostra-se dependente dos tipos de solo e tem sido relacionado com a presença de matéria orgânica e pH do solo, principalmente pela interação dos compostos orgânicos com moléculas apolares e a forma de apresentação no meio ambiente devido ao pH, onde, a baixa adsorção e boa dissociação do herbicida, favorecem a lixiviação do composto através do solo (AMARANTE JUNIOR et al., 2002). Também é apontada como um dos principais processos que influenciam a interação entre o pesticida e a fase sólida do solo, constituída por argila, matéria orgânica, minerais, sílica, óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro (VIEIRA et al., 1999). A adsorção é um dos fatores que interferem na disponibilidade de uma substância aplicada no solo, sendo consequência da atração física ou química de uma substância e uma superfície, podendo ser considerada como um meio de equilíbrio entre a substância adsorvida pelas partículas do solo e a disponibilidade na solução do solo, onde uma parte das substâncias engloba-se a solução do solo e a outra é atraída pelas partículas coloidais (GUIMARÃES, 1987).

O 2,4-D apresenta baixa adsorção em solos com baixos teores de matéria orgânica e maiores em solos com mais matéria orgânica (VIEIRA et al., 1999). Os mesmos autores relatam alta dessorção do ácido 2,4-D em solo calcinado, restando baixa concentração do herbicida na matriz do solo. A matéria orgânica solúvel na solução do solo afeta as características de sorção do ácido 2,4-D (SPARK; SWIF, 2002). O termo sorção é utilizado para retratar a retenção de moléculas orgânicas pelo solo, uma vez que existe certa dificuldade de distinguir quais dos processos (adsorção, absorção, precipitação e partição hidrofóbica) estão atuando concomitantemente ou individualmente, sendo considerado reversível, pois as moléculas podem retornar a solução do solo através do processo de dessorção (CHRISTOFFOLETI et al., 2009). A dessorção ou partição de constituintes da fase sólida para fase líquida depende dos mesmos fatores que influenciam a adsorção (LEITE, 2000).

De acordo com Boivin et al. (2005) o principal limitador da disponibilidade do herbicida 2,4-D, em estudo realizado em dois solos argilosos e um arenoso, é a biodegradação por microrganismos presentes no solo. A biodegradabilidade do herbicida 2,4-D em Latossolo Vermelho Escuro, Glei Húmico, Latossolo Roxo Distrófilo e Latossolo Roxo ocorre em aproximadamente 28 dias em temperaturas variando de 20 a 22 °C, Gleissolo Melânico Alumínico incéptico, Latossolo Vermelho Distroférico típico e Latossolo Vermelho Distrófico psamítico entre 16 e 32 dias com temperaturas entre 20 e 21 °C (IBAMA, 2019).

Com relação ao pH do solo o entendimento do comportamento do herbicida 2,4-D não tem apresentado resultados relevantes para determinar processos de retenção do herbicida no solo (SPADOTTO; MATOLLO; GOMES, 2003). De acordo com Silva et al. (2020) o comportamento do herbicida 2,4-D não depende de um fator, mas da associação e relação de vários como fatores relacionados ao herbicida (concentração, formulação) e características do solo (matéria orgânica, granulométrica, pH e atividade microbiana).

Entender o comportamento dessas substâncias no solo é de extrema importância para que realizar o manejo adequado e eficiente dos herbicidas e aplicar novas técnicas, como a agricultura de precisão, visando à utilização de doses adequadas dos herbicidas em função das características do solo que mais influenciam na retenção e conseqüentemente na disponibilidade para as plantas e menor potencial de mobilidade (DE OLIVEIRA JR; INOUE, 2011).

2.3. Transporte de herbicida no solo

O transporte de herbicidas no solo pode ocorrer por escoamento superficial, lixiviação e volatilização (VIEIRA et al., 1999). No entanto, esta pesquisa delimita-se a lixiviação.

2.3.1. Lixiviação

A Lixiviação refere-se ao fluxo descendente do produto químico e água no solo, através da difusão do ar nos poros e da difusão na água no solo, diretamente relacionado com as características do herbicida e do solo, geralmente, teor de matéria orgânica ou argila do solo, solubilidade do herbicida e quantidade de água que se move no perfil (GUIMARÃES, 1987).

O fluxo da água no perfil de solo interfere no comportamento dos herbicidas, dentre os fatores, que influenciam esse movimento destaca-se a textura, a umidade, o teor de matéria orgânica, composição, porosidade, pH e densidade do solo (ISMAIL; AHMAD, 1994). Nesse sentido, Inoue et al. (2007) constata que, em solos caracteristicamente pobres de carbono orgânico a textura pode ser um dos fatores mais influenciador do movimento de herbicidas no solo (INOUE et al., 2007). Para Pereira (2017) o conhecimento do teor de matéria orgânica do solo e probabilidade de um herbicida ser lixiviado devido esta característica pode determinar a seletividade e/ou eficácia do herbicida no controle de plantas daninhas, assim como, o risco de contaminação das águas subterrâneas.

A água da chuva ou de irrigação pode transportar parte do herbicida que atinge o solo, primeiramente sob a condição saturada e posteriormente fluem sob a condição insaturada, nestas duas etapas agem sobre o herbicida a força de difusão no interior dos agregados e a adsorção pelos colóides do solo (SOUSA et al., 2000). Esse movimento também é influenciado pela quantidade total, lâmina e frequência das águas da chuva e/ou irrigação (GUIMARÃES, 1987). Sob ótica semelhante, Inoue et al. (2007) consideram que, em condições de chuvas ou irrigações intensas os herbicidas derivados de ácidos fracos podem lixiviar de modo expressivo, podendo afetar a atividade do herbicida, a persistência no solo e no ambiente e o potencial de impacto aos aquíferos.

Os diferentes tipos de solo apresentam características físicas, químicas e biológicas distintas que podem particularizar a natureza e a lâmina dos processos de lixiviação entre os solos, definindo-se assim, a preferência por herbicidas com menor potencial de lixiviação ou alteração de doses, quando utilizados em solos distintos (SOUSA et al., 2000). A movimentação dos herbicidas nos solos também é influenciada pelas suas próprias características físico-químicas das moléculas, solubilidade em água (S), formulação e

aditivos, sendo que pequenas mudanças na estrutura química dessas moléculas podem aumentar ou diminuir a dinâmica no solo (DE OLIVEIRA JR; INOUE, 2011).

O potencial de lixiviação de herbicidas pode ser analisado por técnicas analíticas, as quais possibilitam a identificação e quantificação de resíduos do herbicida no solo e na água, as mais utilizadas são radioisótopos e cromatografia líquida e gasosa, porém são técnicas com custo elevado e a utilização de bioindicadores em estudos com colunas de solo, apresenta-se como uma técnica alternativa (INOUE et al., 2010).

A lixiviação de herbicidas no perfil do solo tem efeitos diretos na contaminação do solo e de recursos hídricos do subsolo, pois na superfície onde estão as maiores concentrações de matéria orgânica e atividade microbiana, existe maior probabilidade desses compostos serem degradados (MATALLO, 2003). A remoção ou redução dos herbicidas no ambiente edáfico pode ocorrer por biodegradação, porém é necessário que o herbicida esteja disponível no solo e os microrganismos presentes tenham as enzimas necessárias (SBANO et al., 2013).

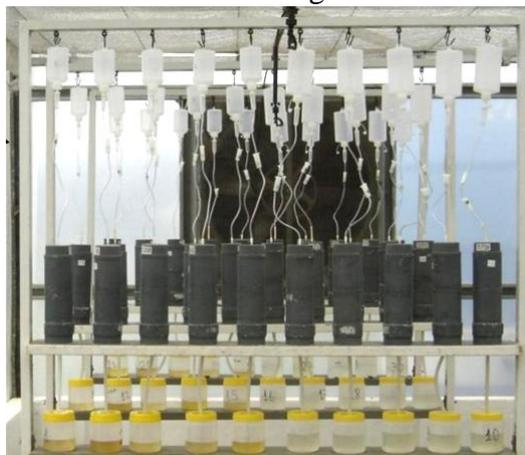
2.4. Simuladores de chuva

A capacidade da água infiltrar no solo pode ser determinada por diversos equipamentos, os simuladores de chuva são frequentemente utilizados aplicando água por aspersão, sendo possível controlar a lâmina da precipitação, o tamanho e velocidades das gotas (MONTEBELLER et al., 2001).

Os efeitos da chuva sobre o solo são difíceis de serem analisados e quantificados, pois não se tem controle da lâmina, duração, distribuição e tipo de chuva, nesse sentido, simuladores de chuva são utilizados em estudos do comportamento da chuva, água ou soluções sobre o solo, possibilitando criar situações controladas (DE SOUZA, 2004). A calibração das lâminas de chuva pode ser realizada conforme objetivo da pesquisa, podendo ser calibradas lâminas próximas ou iguais a média local ou também lâminas de interesse para o estudo (SILVA, 2005).

Um modelo de simulador (Figura 3) barato, de fácil construção e eficiente é construído com frascos, mangueiras e dosadores de fluxo usados na administração de soro fisiológico em hospitais (BANBERG et al., 2012).

Figura 3 - Estrutura do simulador de chuvas construído com materiais de administração de soro fisiológico.



Fonte: Bamberg et al. (2012).

2.5. Colunas de solo

A movimentação de herbicidas no solo é comumente estudada em laboratório, utilizando colunas de solo deformado ou lisímetros, as determinações obtidas através desses estudos possibilitam a classificação em bastante móveis (movimentam-se junto com a frente de molhamento) até quase imóveis (CHRISTOFFOLETI et al., 2009).

Os estudos em colunas de solo possibilitam obter os parâmetros quantitativos do movimento de contaminantes através do solo ou de outro material granular, observar os efeitos das reações químicas e biológicas no transporte dos contaminantes em meio poroso, obter curvas de lixiviação, analisar as relações de competitividade entre diferentes íons contaminantes submetidos no mesmo corpo de prova, compatibilidade do solo com os contaminantes e avaliar o comportamento de contaminantes em aquíferos regionais (LEITE, 2000).

As colunas de solo são muito usadas para avaliar o potencial de lixiviação de agrotóxicos no solo, sendo construídas com PVC e revestidas com parafina (INOUE et al., 2002). O revestimento com parafina impede que ocorra escoamento preferencial pelas laterais das colunas (DA SILVA, 2017).

A metodologia com colunas de solo deformado se aproxima mais da realidade, mesmo que teoricamente o uso de solo indeformado caracterize melhor as condições de campo, porém em colunas de solo indeformado os pontos extrapolaram a continuidade do processo, se distanciando da tendência natural de continuidade e declínio uniforme dos processos físicos (SAMPAIO et al., 2010).

As colunas de solo são sistemas de baixo custo que geram resultados satisfatórios, eficientes e precisos das condições da dinâmica de herbicidas, além disso, os estudos

necessitam de tempo reduzido pelo fato de construir e analisar várias colunas ao mesmo tempo (LEITE, 2000).

2.6. Uso de bioindicadores na avaliação do potencial de lixiviação de herbicidas

Os bioensaios e biomonitoramento ambiental utilizando plantas vem aumentando nos últimos anos e deve aumentar mais, visto que os testes de toxicidade em animais são insuficientes para avaliação de risco ambiental de um composto, portanto não deve-se avaliar a toxicidade de um herbicida apenas com testes em animais, da mesma forma que não se deve avaliar a toxicidade de um inseticida somente com teste em plantas (WANG, 1991).

O melhor bioindicador é aquele mais sensível ao elemento tóxico e que durante a fase de testes passa por todos os processos da vida (germinação, crescimento, desenvolvimento, metabolismo, fotossíntese e reprodução), pois cada processo é inibido por um tóxico ou por diferentes concentrações desse tóxico, resultando na inibição do crescimento e morte (WANG; WILLIAMS, 1990).

A Fitotoxicidade do bioindicador permite avaliar a dinâmica de substâncias no solo. Quanto maior a profundidade de lixiviação, principalmente em solos arenosos, maior será a probabilidade de fitointoxicação em diferentes profundidades do solo (CHRISTOFFOLETI et al., 2009). A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA, 1996) indica para a realização de ensaios de fitotoxicidade o uso de espécies de alface, aveia, azevém perene, cebola comum, cenoura, couve, pepino, soja e tomate, além destas, outras espécies de importância regional e econômica podem ser utilizadas.

O *Cucumis sativus* (pepino) é uma dicotiledônea muito importante na agricultura e apresenta bons resultados em análises dos efeitos de substâncias químicas, podendo serem observados os parâmetros que afetam a germinação, crescimento e reprodução (MUNZUROGLU; GECKIL, 2002). Foi utilizado por Leal et al. (2020) para determinar o potencial de lixiviação da mistura comercial de 2,4-D + picloram em colunas de solo e sob precipitações semanais de 60 mm durante 4 semanas, possibilitando avaliar a lixiviação da mistura através de análises de fitotoxicidade do bioindicador. Em estudo realizado por Andrade et al. (2020) o pepino apresentou deformação foliar, necrose parcial das folhas, retorcimento das raízes e envelhecimento celular de algumas plantas em todas as profundidades avaliadas em estudo da lixiviação dos herbicidas 2,4-D e Atrazina em Latossolo Vermelho-amarelo, identificando o potencial do herbicida 2,4-D ser lixiviado até os 30 cm de profundidade do solo.

O pepino também foi utilizado por Franceschi et al. (2017) como bioindicador do comportamento do herbicida 2,4-D + picloram em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, onde foram analisadas a fitointoxicação, altura de plantas, comprimento radicular e área foliar e verificou-se que houve lixiviação ao longo dos 50 cm da coluna estudada. Dentre as espécies estudadas por Santos et al. (2013) o pepino foi a que apresentou maior sensibilidade a baixas concentrações de herbicidas auxínicos, a dose de 23,25 g ha⁻¹ foi suficiente para inibir 50% o acúmulo de massa da matéria seca total.

2.7. Neossolos

Os solos são corpos tridimensionais naturais, constituídos por partes sólidas, líquidas e gasosas, formados por materiais minerais e orgânicos que ocupam a maior parte do manto superficial terrestre (SANTOS et al., 2018; SOIL SCIENCE DIVISION STAFF, 2017). A formação dos solos depende das características do material de origem (rochas) e das características da região ou local como clima, relevo e atividade de microrganismos (BECKER, 2008). Os processos desencadeados por essas características determinam as feições do solo como cor, altura dos horizontes e composição granulométrica (areia, silte e argila) (BECKER, 2008). A diversidade de solos do território brasileiro está diretamente relacionada com as diferentes formas e tipos de relevo, clima, material de origem, vegetação e organismos associados (MANZATTO; FREITAS JUNIOR; PERES, 2002).

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (SANTOS et al., 2018) identificou 13 grandes grupos de solos no Brasil, sendo os três maiores grupos o Latossolo, Argilossolo e Neossolo, respectivamente (IBGE, 2020). O Neossolo está presente em todas as regiões do país, ocupando 13,38% da área (IBGE, 2020) e o seu segundo nível categórico é composto por Neossolos Litólicos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Regolíticos e Neossolos Quartzarêncios (SANTOS et al., 2018).

O Neossolo litólico apresenta contato lítico ou lítico fragmentado entre os primeiros 50 cm de profundidade, podendo apresentar horizonte A ou hístico imediatamente sobre a rocha ou sobre horizonte C ou Cr ou sobre fragmentos grosseiros que componham 90% ou mais da sua massa (SANTOS et al., 2018).

O Escudo Rio-grandense localizado nas regiões fisiográficas Serra do Sudeste e Encosta do Sudeste é constituído em sua maior parte por Granitos e Gnaisses que dão origem a solos com alto teor de areia grossa em relação a areia fina (LEMOS, 1973).

O município de Caçapava do Sul está inserido no Escudo Rio-grandense, apresenta duas unidades taxonômicas: Unidade Guaritas formada por Neossolo Litólicos Distrófico típico e Neossolo Regolítico Distrófico léptico e Unidade Caldeirão formada por Argilossolos vermelho-amarelo (LEMOS, 1973; SANTOS et al., 2018).

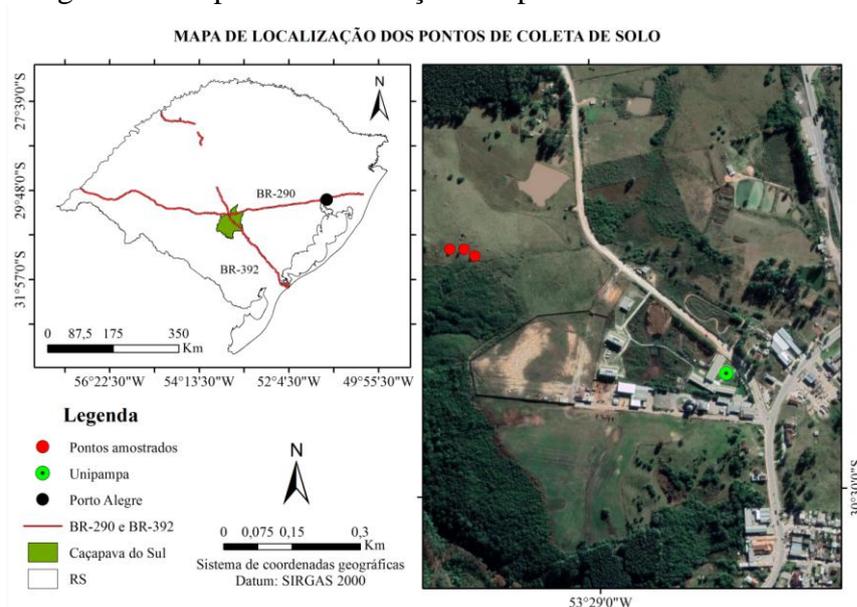
Os solos da Unidade Guaritas são rasos, com coloração bruno acinzentada escura, arenosos, bem drenados, ácidos com pH água próximo a 5, saturação de bases em torno de 50%, matéria orgânica inferior a 2%, Horizonte A podendo alcançar aproximadamente 40 cm e Horizonte R ou C, constituído por arenito em maior ou menor grau de intemperização (LEMOS, 1973).

3. METODOLOGIA

3.1. Área e procedimento de coleta do solo

Para realização do estudo de lixiviação do herbicida 2,4-D foram utilizadas amostras deformadas de solo, proveniente de uma área (Figura 4) da Universidade Federal do Pampa, no município de Caçapava do Sul - RS. As coletas do solo foram baseadas no Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo da Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias – EMBRAPA (SANTOS et al., 2005) e no Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para Análise da Qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos – Embrapa Meio Ambiente (PIRES et al., 2006).

Figura 4 – Mapa de identificação dos pontos de coleta de solo.



Fonte: autora (2021).

A amostragem de solo foi realizada no dia 16 de fevereiro de 2021, seguindo um caminhar em ziguezague em 3 pontos dentro da área de amostragem, cujas coordenadas são: ponto 1 (-30495215S, -53485980W), ponto 2 (-30495081S, -53486223W) e ponto 3 (-30495073S, -53486547W), certificando-se que todas as amostras apresentavam a mesma textura e cor.

As amostras foram coletadas utilizando pá de corte e armazenadas cerca de 20 kg de cada ponto em baldes (Figura 5-a), devidamente etiquetados com cartolina, contendo o nome do projeto, instituição, classificação, município, estado, horizonte, profundidade, nome do coletor e data (Figura 5-b). Após a coleta o solo foi colocado à sombra para secar (Figura 5-c) e aos poucos foi realizado o destorroamento para a secagem uniforme do solo.

Figura 5 – Coleta e preparo do solo: a) coleta em campo; b) armazenamento e identificação; c) secagem do solo.



Fonte: autora (2021).

3.2. Estudo de lixiviação

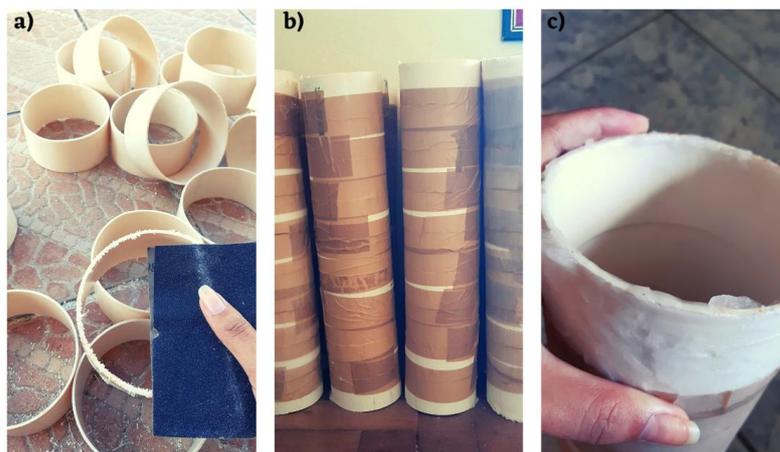
Para o estudo de lixiviação do herbicida 2,4-D em colunas de solo, foi adotado o esquema fatorial 3 x 4 x 2, com lâminas de irrigação (0, 40, 80 mm) e profundidades analisadas (0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,40 m) na presença e ausência do herbicida, em triplicatas, totalizando 72 parcelas experimentais.

3.2.1. Construção das colunas de Solo

A construção das colunas de solo seguiu a metodologia de Da Silva (2017) com adaptações. Tubos de PVC de 100 mm de diâmetro foram cortados, lixados (Figura 6-a) e após unidos por fita adesiva, formando 18 colunas com dimensões de 100 mm de diâmetro e 450 mm de altura, com seccionamento a cada 100 mm até os 400 mm de profundidade (Figura 6-b) com quatro anéis de 100 mm e um anel superior de 50 mm. O anel superior tem função de impedir o escoamento superficial.

A profundidade do experimento foi determinada de acordo com as considerações de Pires et al.(2006), que consideram que agrotóxicos com alto potencial de lixiviação deslocam-se até 40 cm do solo.

Figura 6 – Colunas de solo: a) tubos já cortados e sendo lixados; b)colunas montadas; c) colunas com revestimento em parafina.



Fonte: autora (2021).

Para que não ocorresse escoamento preferencial pelas laterais, as colunas foram revestidas por parafina aquecida até o ponto de ebulição. Os tubos de PVC foram imersos no líquido e em seguida postos para secar em temperatura ambiente.

Visando reter o solo e possibilitar a drenagem na base das colunas foi alocada uma dupla camada de TNT (tecido não tecido) com cores diferentes para identificar os tratamentos do herbicida, sem herbicida (preto) e com herbicida (vermelho).

Posteriormente as colunas foram preenchidas gradualmente com solo (Figura 7-a), realizando leves “batidas” nas paredes das colunas durante o preenchimento para obter uma distribuição e acomodação mais uniforme do solo. As colunas foram pesadas (Figura 7-b), zerando o peso do PVC, da dupla camada de TNT e da bandeja de isopor, para obter o mesmo peso, o qual foi fixado para todas as colunas em 4,250 kg.

Figura 7 – Preenchimento das colunas com solo (a); pesagem das colunas (b).



Fonte: autora (2021).

3.2.2. Pulverização do herbicida

Para realizar o ensaio de lixiviação foi utilizado o herbicida 2,4-D produzido pela Sumitomo Chemical Brasil Indústria Química S.A., diluído em água (calda). A dose usada na área do experimento foi definida em relação à média da dose mínima para ocorrer efeito e a dose máxima definida com base nas recomendações agrônômicas para a maioria das culturas de aplicação indicadas por Sumitomo Chemical (2020), assim como o volume de calda aplicado (Tabela 1).

Tabela 1 - Dosagens e volume de calda recomendados e definidos para o experimento.

Concentração de i.a (g/l)	Doses (l p.c/ha)			Volume da calda (l/há)	Área (m ²)	Dose (ml/0,18m ²)	Volume de calda (ml/0,18m ²)
	Mínima	Máxima	Média				
806,00	0,30	3,50	1,90	400	0,09	0,02	3,60

Fonte: autora (2021).

Para a utilização do pulverizador de 20 litros é necessário no mínimo 2 litros de calda, desta forma foram utilizados 10 ml de 2,4-D e 2 litros de água e para a pulverização da dose definida para o estudo foi cronometrado o tempo para coletar 3,6 ml em um recipiente graduado, conforme metodologia de Chaim (2009). A aplicação foi realizada em 0,6 segundo, de acordo com o tempo definido a partir da cronometragem.

A pulverização do herbicida foi realizada na Escola Técnica Estadual Dr. Rubens da Rosa Guedes (Figura 8), utilizando Pulverizador Costal Simétrico - Guarany, com capacidade de 20 litros, pressão máxima de 5,10 kg/cm² e vazão de ponta regulável de 600 ml/min. As colunas de solo foram organizadas formando uma área de 0,09 m², para que a pulverização fosse uniforme a aplicação foi realizada aproximadamente 0,50 m acima das bordas das colunas, em dia com ventos fracos para evitar a deriva, horário com temperatura amena e utilizando EPI's de uso pessoal.

Figura 8 - Pulverização do herbicida 2,4-D nas colunas de solo.



Fonte: autora (2021).

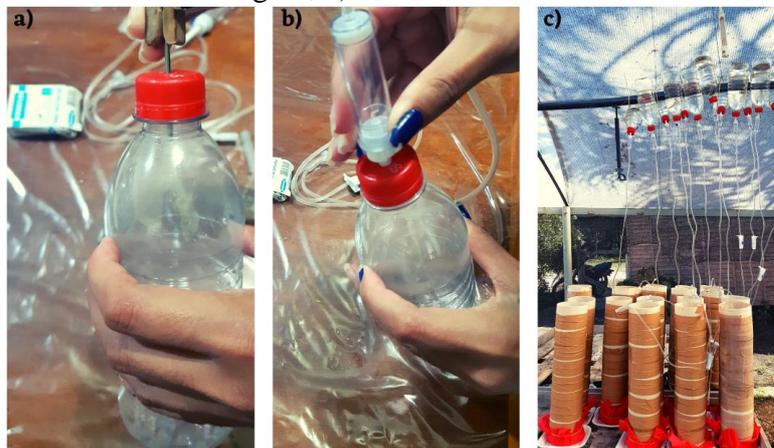
3.2.2.1. Simulação de chuva

O sistema de simulação de chuva foi construído baseado na metodologia apresentada por Bamberg et al. (2012) utilizando equipos de macrogotas (20 gotas equivalem a um volume de 1 ml) e garrafas PET's (Figura 9-a,b). Foi observado em teste antes da simulação que as pinças rolete corta fluxo dos equipos eram muito sensíveis, então optou-se por obter aproximadamente a mesma velocidade de gotas, mesmo que as pulverizações das diferentes lâminas não terminassem ao mesmo tempo.

A simulação ocorreu uma hora após a pulverização do herbicida (Figura 9-c), com lâminas de água (0, 40, 80 mm), com velocidade aproximada de 35 gotas/min e aproximadamente 3h para simulação de 40 mm e 6h para 80 mm, variando a localização da

ponta do equipo no topo das colunas para não ocorrer percolação somente em um ponto, após o término da simulação as colunas permaneceram em repouso por 72h.

Figura 9 – Simulação de chuva: a; b) construção do simulador com equipo de administração de soro fisiológico; c) sistema em funcionamento.



Fonte: autor (2021).

3.2.3. Unidades experimentais

As unidades experimentais foram compostas pelos anéis que compõem cada coluna. Deste modo, os anéis foram separados, cortando-se a fita adesiva com o uso de um estilete (Figura 10-a) e plástico fino e resistente para separar o solo dentro da coluna (Figura 10-b).

Cada unidade experimental recebeu em sua base uma dupla camada de TNT com a cor correspondente a seu tratamento, foi colocada sobre um prato de isopor e acomodada em ordem sobre as bancadas (Figura 10-c).

Figura 10 - Preparação das unidades experimentais: seccionamento da coluna (a), separação do solo dentro da coluna (b), etiquetagem e acomodação dos anéis (c).



Fonte: autora (2021).

3.2.4. Semeadura do Bioindicador

O pepino (*Cucumis sativus*) foi utilizado como bioindicador, conforme metodologia de Franceschi et al. (2017), devido ser uma dicotiledônea sensível e o 2,4-D ter função de controlar essa classe de plantas. Logo após o seccionamento das colunas foram realizadas aberturas de aproximadamente 1 cm de profundidade no centro das unidades experimentais para semear o bioindicador (Figura 11-a), em cada anel foram semeadas três sementes de pepinos (Figura 11-b).

Para proporcionar condições favoráveis para o desenvolvimento de bioindicador às parcelas experimentais foram mantidas em estufa na Escola Técnica Estadual Dr. Rubens da Rosa Guedes.

Figura 11 – Semeadura do bioindicador: aberturas nas unidades experimentais (a), semeadura das sementes de pepino.

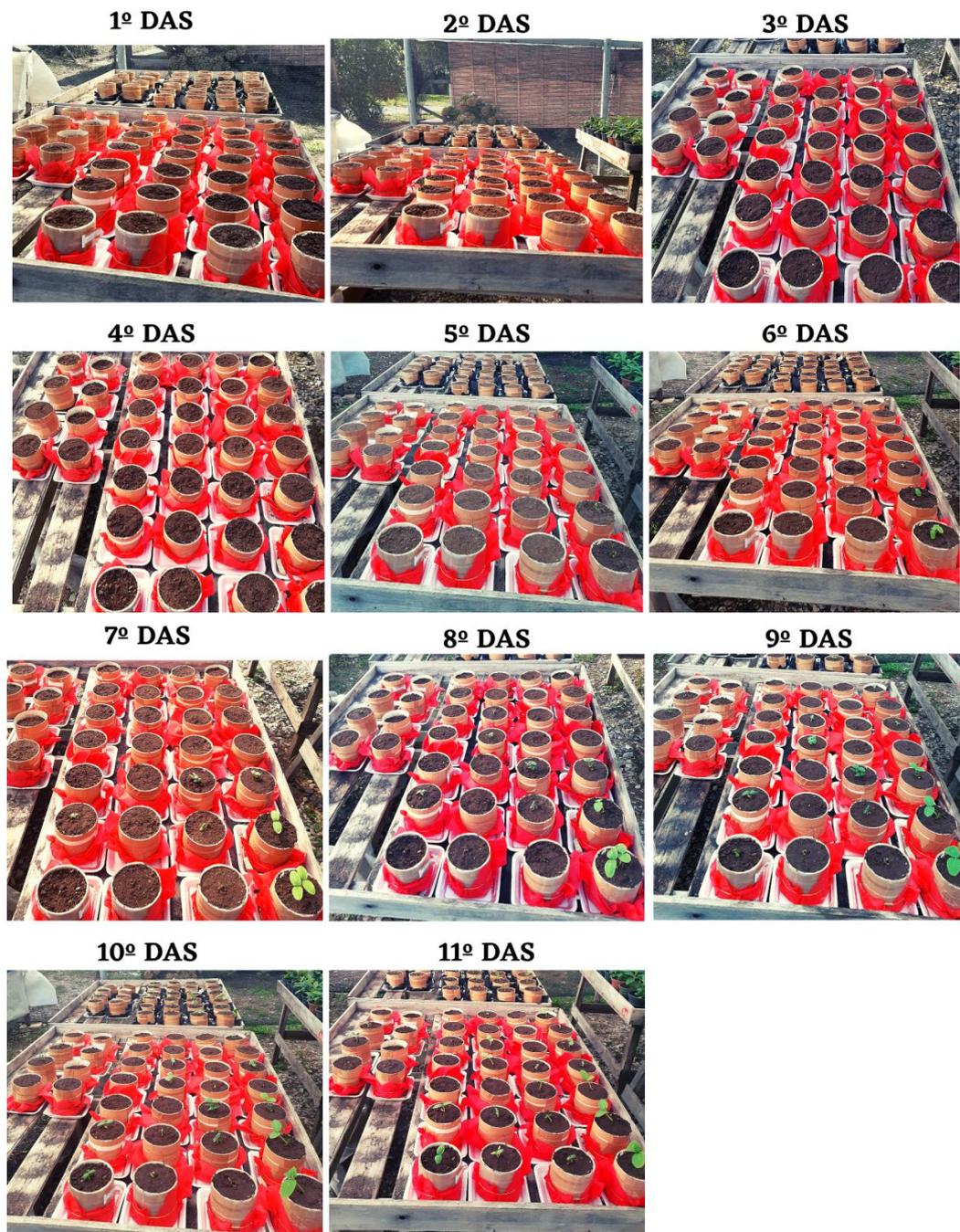


Fontes: autora (2021).

Análises do bioindicador

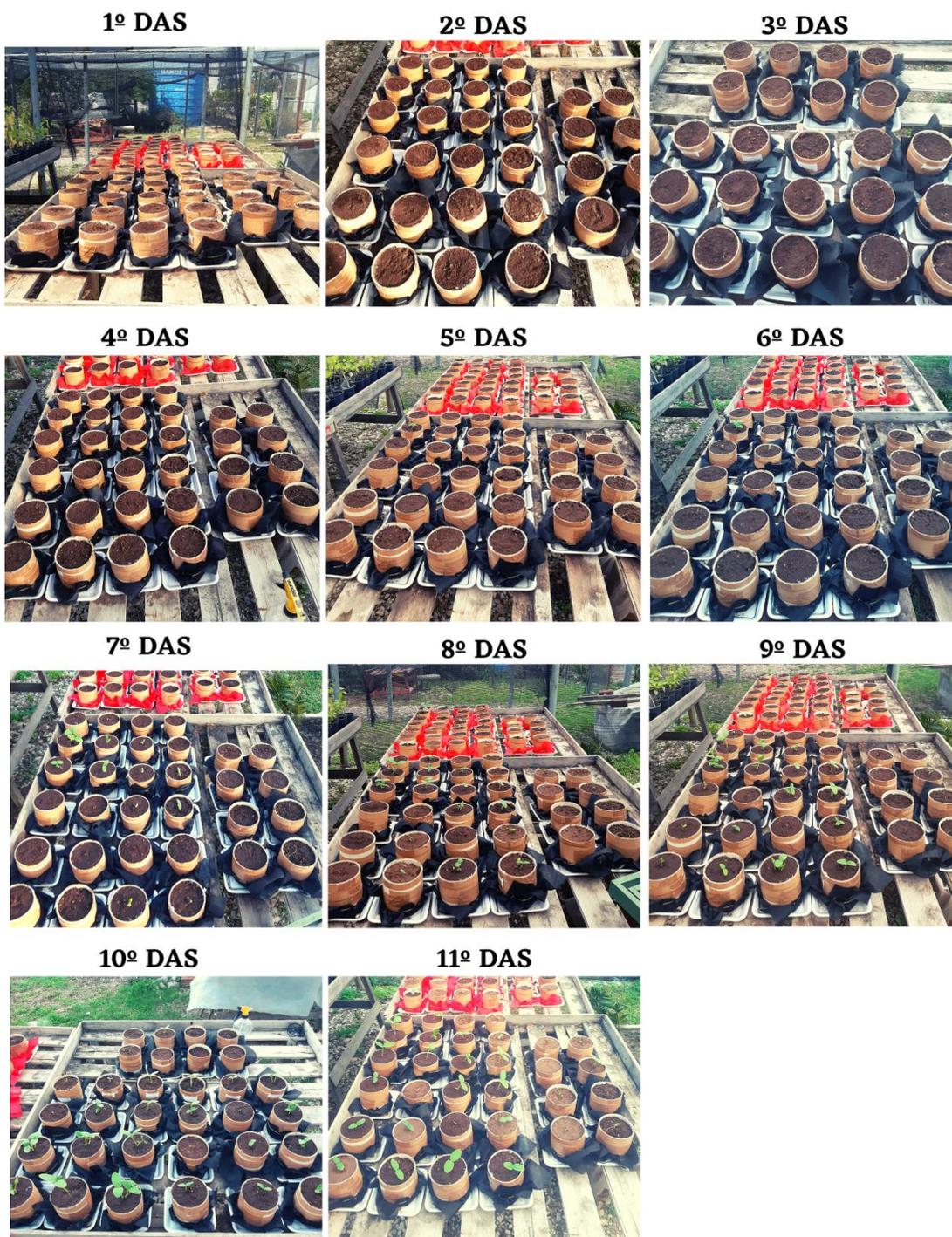
As análises do bioindicador iniciaram no 1º dia após a semeadura (DAS) e foram realizadas até o 11º DAS, nas unidades experimentais com herbicida 2,4-D (Figura 12) e nas unidades sem o herbicida (Figura 13), observando a emergência (Figura 14) a fim de determinar o índice e o percentual de emergência de plântula do pepino (*Cucumis sativus*).

Figura 12 – Unidades experimentais que receberam o herbicida 2,4-D, durante os 11 DAS.



Fonte: autora (2021)

Figura 13 – Unidades experimentais que NÃO receberam herbicida, durante os 11 DAS.



Fonte: autora (2021).

Figura 14 – Fase de emergência de plântula.



Fonte: autora (2021).

3.2.5. Índice de velocidade e Percentual de emergência de plântula

O percentual de emergência de plântula foi determinado conforme metodologia de Dias et al. (2019). A emergência foi analisada até os 11 dias após a semeadura (DAS), considerando o número total de sementes adicionadas a cada unidade experimental e o número de sementes germinadas, sendo a percentagem de emergência calculada pela equação (12).

$$\%E = \frac{NSG}{NTS} \times 100 \quad (12)$$

Onde: %E - percentagem de emergência; NSG - número de sementes germinadas e NTS - número total de sementes.

O Índice de velocidade de emergência foi analisado diariamente até o 11º DAS, considerando o número de emergência em cada dia e determinado conforme metodologia proposta por Oliveira et al. (2009), com base na equação (13).

$$IVE = \frac{NE1}{T1} + \frac{NE2}{T2} + \dots + \frac{NE_n}{T_n} \quad (13)$$

Onde: IVE - Índice de velocidade de emergência; T₁, T₂, T_n - número de dias de semeadura da primeira, segunda, até a última contagem e NE₁, NE₂ e NE_n - número de emergências de sementes germinadas em T₁, T₂ e T_n.

3.3. Análise estatística dos dados

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste F com a probabilidade (P) menor que 0,05 ($P < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas nos Softwares Excel e Bioestat e os gráficos foram gerados no Software GraphPad Prism 9, conforme as fontes de variação determinadas na Tabela 2 sugeridas por Silva et al (2020) com modificações.

Tabela 2 - Arranjo estatístico da análise de variância.

Fontes de Variação	Graus de liberdade
Herbicida (H)	1
Lâminas (L)	3
Profundidade (Z)	4
H x L	3
H x Z	4
L x Z	12
L x Z x H	12

Fonte: modificado de Da Silva (2017).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D em função de diferentes lâminas de chuva simulada deveria ter sido feita a partir de análises de fitotoxicidade do bioindicador, possibilitando assim relacionar as lâminas de chuva, a presença do herbicida e a profundidade atingida via percolação. Porém boa parte dessas análises não pôde ser realizada devido à pandemia causada pela Covid-19, pois ocorreram diversas restrições em nível mundial, federal, estadual e municipal, uma dessas restrições foi quanto às atividades presenciais em universidades federais e privadas.

As unidades experimentais deveriam ser mantidas em ambiente fechado e com condições adequadas para o desenvolvimento do bioindicador, desse modo o presente experimento foi planejado para ser desenvolvido dentro de laboratório com uma pequena estufa instalada sobre as bancadas.

Tendo em vista essa situação as unidades experimentais foram mantidas em estufa semiaberta na Escola Técnica Estadual Rubens da Rosa Guedes. Essas unidades foram atacadas por insetos da espécie *Diabrotica speciosa*, besouros popularmente conhecidos por

vaquinha ou vaquinha-verde-amarela, no 12° (DAS), impossibilitando as análises visuais de fitotoxicidade do bioindicador que iniciariam no 12° (DAS) e se entenderiam até o 18° (DAS) e também as análises laboratoriais de altura, clorofila, massa fresca, biomassa, área foliar, volume de raiz e grau de suculência que seriam realizadas após o 21° (DAS).

Além disso, a determinação das propriedades físicas e químicas do solo também foi afetada pela dificuldade de acesso aos laboratórios da universidade.

4.1. Emergência de plântula do bioindicador

A emergência de plântula do *Cucumis sativus* (pepino) foi observada durante 11 dias após a semeadura (DAS) e o percentual de emergência foi calculado relacionando o número de emergência com o número de sementes adicionadas em cada unidade experimental. As observações diárias de emergências estão apresentadas nos Apêndices 1 ao 6, separados por tratamentos (presença de 2,4-D e testemunha sem 2,4-D), lâminas de chuva simulada (0 mm, 40 mm e 80 mm) e profundidades das colunas (0-10, 10-20,20-30,30-40 cm).

Ressalta-se que uma das colunas que não receberia chuva simulada foi “perdida”, sendo assim, os dados apresentados para uma coluna da triplicata foram calculados pela análise de Valor Faltante.

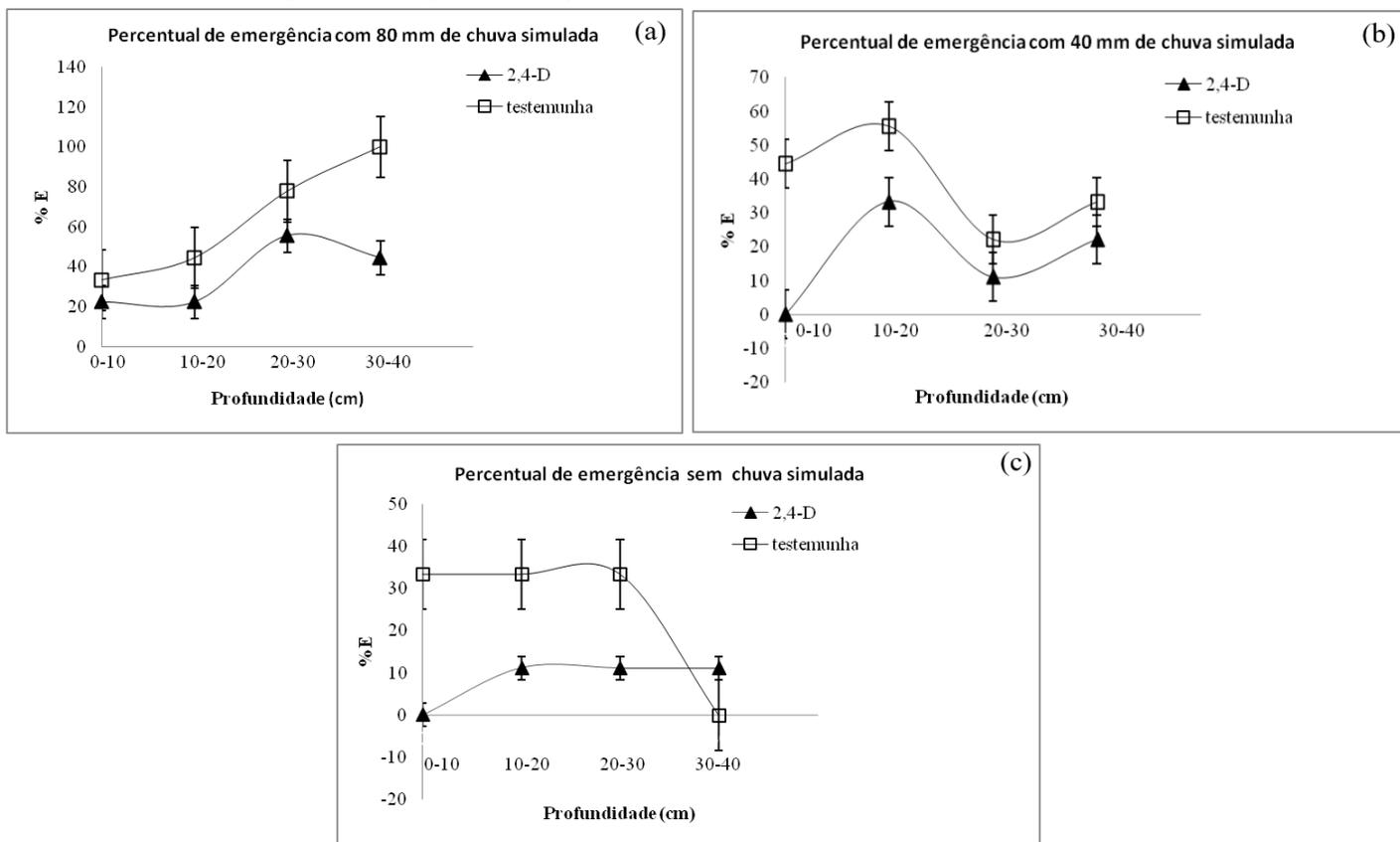
A análise de variância do percentual de emergência (Apêndice 7) não apresentou diferença estatística entre as interações dos tratamentos com os parâmetros analisados (lâminas de chuva e profundidade da coluna).

A média do percentual de emergência do pepino nas colunas sem o herbicida foi maior em relação às colunas que receberam o 2,4-D em todas as profundidades com lâminas simuladas de 40 e 80 mm (Figura 15 - a, b). Esse resultado pode apontar possível lixiviação do herbicida 2,4-D até os 40 cm das colunas. Assim como evidenciado por Christoffeleti et al. (2009) quanto maior for a profundidade de lixiviação, maior é a probabilidade do herbicida afetar o desenvolvimento do bioindicador em qualquer profundidade estudada do solo, sobretudo em solos arenosos.

A média do percentual de emergência do bioindicador quando submetido a diferentes lâminas de chuva simulada (Figura 15 a,b,c) aumentou, conforme maior foi à lâmina simulada. Observa-se que apesar de ambos tratamentos terem variado de acordo com as lâminas de chuva simulada, as colunas sem o herbicida 2,4-D apresentaram maior percentual de emergência. Isso pode estar relacionado à umidade do solo nas colunas que fornece condições adequadas para o desenvolvimento do pepino. Já nas colunas com o herbicida pode

estar relacionado a capacidade do herbicida solubilizar em água e diminuir sua concentração com o aumento do volume de água adicionado. Segundo De Oliveira e Brighenti (2011) a movimentação vertical (lixiviação) do herbicida é influenciada por vários fatores, entre eles a solubilidade da molécula em água. Resalta ainda que maiores intensidades de chuva em pouco tempo favorecem as perdas de produto por lixiviação.

Figura 15 – Interação do Percentual de Emergência do pepino com as profundidades das colunas nos tratamentos com herbicida 2,4-D e sem (testemunha) e lâminas de chuva simulada: a) 80 mm; b) 40 mm; c) 0 mm.



Fonte: autora (2021).

O contrário foi observado por Da Silva (2017) em estudo utilizando soja como bioindicador e colunas preenchidas com Latossolo, onde o tratamento com 2,4-D apresentou maiores percentuais de emergência em relação à coluna de solo sem o herbicida, porém essa diferença ocorreu apenas nas profundidades iniciais (5 – 10, 10 – 15 e 15 – 20 cm). O autor considera que o incremento do percentual de emergência da soja nas camadas superficiais das colunas pode indicar menor percentual do herbicida 2,4-D com efeito hormonal sobre o bioindicador. Sugere ainda que a disponibilidade do herbicida nessas camadas pode ter sido afetada pela sua biodegradação. Fato apontado no Portal do Conteúdo Agropecuário, que

considera, a disponibilidade do herbicida 2,4-D é afetada principalmente pela degradação por microrganismos do solo. Declara ainda, que quanto maior a atividade microbiana, mais rápida é a degradação do 2,4-D e a taxa de degradação aumentará com o aumento de teor de matéria orgânica, pH e temperatura. De acordo com De Oliveira e Brighenti (2011) a biodegradação dos herbicidas é favorecida nas condições de pH entre 6,0- 8,0, altos teores de matéria orgânica, umidade do solo entre 50% - 100% da capacidade de campo, boa aeração do solo e temperatura entre 27 °C – 32 °C.

Observa-se que a classe de solo utilizada no estudo apresenta características opostas as acima citadas por De Oliveira e Brighenti (2011), conforme os dados tabelados das características químicas do Neossolo Litólico (Tabela 3) pelo site GeoNetwork. Considera-se neste sentido, que a disponibilidade do herbicida no solo do presente estudo pode ter sido pouco afetada pela biodegradação.

Tabela 3 – Características químicas do Neossolo Litólico.

Topo do solo			Subsolo		
pH	% C org	%N	pH	% C org	%N
5,9	0,73	0,76	5,6	0,35	0,08

Fonte: FAO (1974).

O índice de velocidade de emergência de plântulas (Tabelas 4, 5 e 6) determinado pela relação do número de emergência em cada dia não apresentou na análise de variância (Apêndice 7), diferença estatística para a interação entre os tratamentos, profundidades da coluna de solo e lâminas de chuva simulada. Quando a análise de variância apresenta diferença estatística para as interações, outros testes podem ser aplicados como o teste de comparação de médias de Tukey.

Tabela 4 – Índice de velocidade de emergência (IVE) das unidades experimentais com o herbicida 2,4-D.

Profundidades (cm)	Índice de velocidade de emergência		
	Lâminas de chuva Simulada (mm)		
	80	40	0
0-10	0,23	0,00	0,00
10-20	0,18	0,33	0,11
20-30	0,59	0,09	0,11
30-40	0,64	0,20	0,11

Fonte: autora (2021).

Tabela 5 – Índice de velocidade de emergência (IVE) das unidades experimentais sem o herbicida 2,4-D.

Profundidades (cm)	Índice de velocidade de emergência		
	Lâminas de chuva Simulada (mm)		
	80	40	0
0-10	0,33	0,54	0,18
10-20	0,52	0,60	0,18
20-30	0,95	0,25	0,22
30-40	1,36	0,33	0

Fonte: autora (2021).

Tabela 6 – Índice de velocidade de emergência (IVE) de ambos tratamentos: com e sem o herbicida 2,4-D.

Tratamento	Índice de velocidade de emergência		
	Lâminas de chuva Simulada (mm)		
	80	40	0
2,4-D	1,67	0,63	0,33
SEM	3,19	1,72	0,58

Fonte: autora (2021).

Em estudo do potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D, utilizando a soja como bioindicador, Da Silva (2017) observou diferenças estatísticas das interações entre o herbicida, intensidades de chuva simulada e profundidades das colunas de solo. Identificou também maior índice de velocidade de emergência de plântulas da soja nas colunas de solo que receberam a aplicação do herbicida 2,4-D. O autor considerou que a matéria orgânica presente ao longo da coluna de solo pode ter retido e auxiliado na degradação do herbicida.

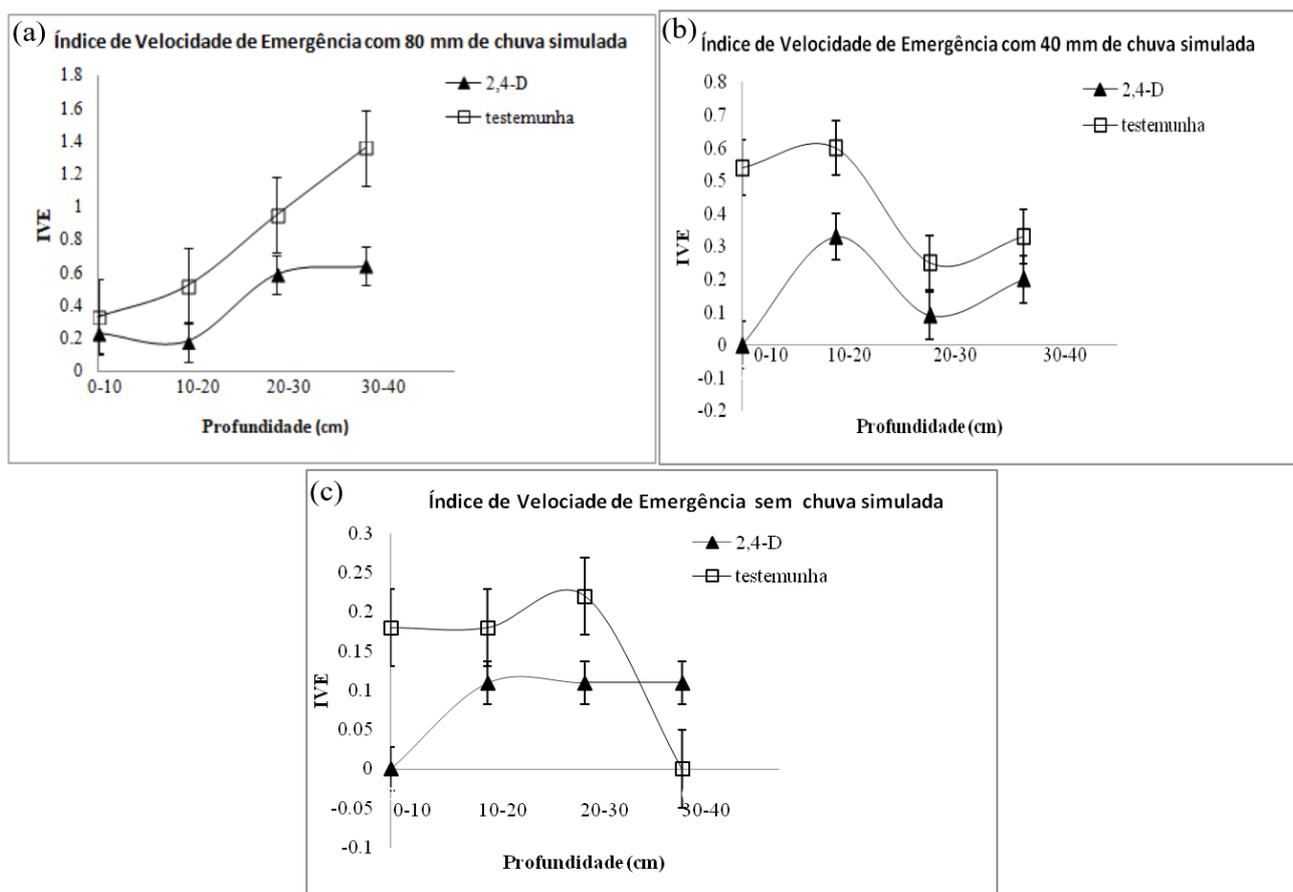
Nas colunas que receberam 80 mm de chuva simulada (Figura 16-a) o índice de velocidade de emergência apresentou para ambos os tratamentos, crescimento com o aumento das profundidades das colunas. As unidades sem o herbicida 2,4-D tiveram maiores IVE comparado com as unidades com o 2,4-D. O IVE nas colunas que receberam 40 mm de chuva simulada (Figura 16-b) nos dois tratamentos foi maior na profundidade (10-20). No topo das colunas com herbicida o IVE foi nulo. Segundo Da Silva (2017), um menor IVE na primeira camada de profundidade pode indicar maior presença de 2,4-D nessa seção da coluna de solo. As outras variações podem estar relacionadas a umidade do solo, pois quando ocorreu o seccionamento observou-se que a água percolada ficou mais retida nas menores profundidades dessas colunas.

O índice de velocidade de emergência de plântula do pepino no topo das colunas que não receberam chuva simulada (Figura 16-c) e receberam o herbicida 2,4-D foi igual a zero e se manteve igual nas demais profundidades. De acordo com De Oliveira e Brighenti (2011) no

solo, o herbicida se distribui uniformemente ao longo do perfil, na horizontal e vertical, nos primeiros 10 cm. Além disso, considera que com o aprofundamento no perfil do solo, a degradação da molécula do herbicida é mais lenta, devido à menor atividade microbiana do solo.

O IVE apresentou crescimento nos dois tratamentos conforme foi aumentando as lâminas de chuva simulada (Figura 16 - a, b, c), porém foi maior na testemunha.

Figura 16 – Interação do Índice de Velocidade de Emergência do pepino com a profundidade das colunas na presença e ausência do herbicida 2,4-D, sem chuva simulada e lâminas de chuva simulada: a) 80 mm; b) 40 mm; c) 0 mm.



Fonte: autora (2021).

Um estudo conduzido por Silva et al., (2011) demonstrou que solos com alto teor de areia, baixa MO e pH ácido apresentam redução significativa no percentual de emergência na presença de 2,4-D em relação aos tratamentos sem o herbicida. Assim como sugerido por Dias et al. (2012) o potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D pode ser mais difícil em solo com alto teor de argila e matéria orgânica. Segundo Alamgir (2016), isso ocorre na fração argila do solo por apresentar alta capacidade de sorção e forte capacidade de ligação, devido a sua grande área superficial específica, estabilidade química e mecânica, estrutura em camadas

e alta capacidade de troca catiônica. Já a matéria orgânica, conforme discutido por Thomé e Knop (2007) é responsável pelo processo de sorção hidrofóbica que retém as substâncias orgânicas, especialmente compostos orgânicos apolares.

Neste contexto, em estudo conduzido por Silva et al. (2011) a porcentagem de emergência da soja foi maior em solo com textura argilosa em relação a solo com textura média (maior teor de areia). Como demonstrado nos estudos de Silva et al. (2020) a emergência da soja em Latossolo argiloso não foi afetada após a simulação de 0, 10, 30, 60 e 90 mm de chuva e aplicação de 300 e 600 g e.e. ha⁻¹ do herbicida 2,4-D. Ao estudar o potencial de lixiviação da mistura comercial dos herbicidas 2,4-D + picloram em solo franco-argiloso-arenoso Leal et al. (2020) observaram que a mistura permanece nos primeiros 30 centímetros de profundidade do solo, mesmo quando sujeito a 240 mm de chuva. Já Andrade et al. (2020) ao estudar a lixiviação do herbicida 2,4-D em Latossolo Vermelho-amarelo, considerou que o herbicida analisado pode atingir uma profundidade de até 30 cm em solo argiloso independente da dose aplicada.

Os Neossolos, classe de solos utilizada neste estudo, caracterizam-se por apresentar baixo teor de matéria orgânica e maior porção de areia (FAO, 1974; LEMOS, 1973). Essas características apresentadas nas (Tabelas 7 e 8) podem ter influenciado nos resultados do índice de velocidade de emergência do pepino que sugerem possível lixiviação do herbicida 2,4-D até as camadas mais profundas das colunas de solo. Segundo Matallo (2003), áreas constituídas por materiais arenosos e elevada macroporosidade são extremamente suscetíveis à lixiviação de produtos, apresentando alta mobilidade no perfil do solo. De acordo com Alamgir (2016) os solos arenosos apresentam maiores tamanhos de poros e menor capacidade de sorção, características responsáveis pela fraca adsorção de substâncias. O autor considera que a baixa adsorção aumenta a lixiviação e pode ter como consequência a contaminação de águas superficiais.

Tabela 7 – Características físicas do Neossolo Litólico.

Topo do solo			Subsolo		
% Areia	% Silte	% Argila	% Areia	% Silte	% Argila
69,9	10,5	19,5	57,5	10,9	31,6

Fonte: FAO (1974).

Tabela 8 – Dados analíticos do Neossolo Litólico Distrófico típico da Unidade Guaritas em Caçapava do Sul, RS.

Horizontes		Complexo sortivo (cmol _c kg ⁻¹)								
Símbolo	Profundidade e cm	Ca	Mg	K	Na	Al	H	CTC	V%	Al%
A ₁	0-20	2,80	1,00	0,14	0,05	0,90	3,20	8,00	50	19
A ₂	20-40	2,50	0,80	0,10	0,15	0,80	3,30	7,70	47	18
C (g Kg ⁻¹)		Composição Granulométrica (g Kg ⁻¹)				Argila Natural (g Kg ⁻¹)	Grau de floculação	Silte/ argila		
		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila					
9,1		490	280	130	100	80	20	130		
8,0		470	290	140	100	80	20	140		

Fonte: Boletim Técnico nº30 – Brasil (1973).

Evidências da relação da textura do solo com o índice de velocidade de emergência de plântula foram relatadas por Silva et al. (2011), entre elas, o IVE da soja em solo de textura média (> teor de areia) foi menor independente da dose aplicada de 2,4-D em relação à testemunha sem o herbicida, nos períodos de 0 e 7 DAS, porém, nos períodos de 5 e 10 DAS houve redução do IVE com o aumento da dosagem de 2,4-D de 502,5 g e.a. ha⁻¹ para 1.005 g e.a. ha⁻¹. De acordo com De Oliveira et al. (2015) o herbicida 2,4-D amina causa redução no desenvolvimento da cultura de soja em virtude do seu efeito residual pelo menos até seis dias após a aplicação do herbicida.

O baixo teor de matéria orgânica do Neossolo, indicado por Lemos (1973), pode ter sido uma característica importante para a lixiviação do herbicida até os 40 centímetros das colunas de solo. Matallo (2003) estudando o potencial de lixiviação de Tebutiuron e o Diuron (compostos não-ionizáveis) em colunas de solo identificou que os teores matéria orgânica menores em Neossolo, comparado ao Latossolo, pode esclarecer a maior mobilidade desses herbicidas nas colunas com Neossolo.

Segundo Amarante Junior et al. (2002) a baixa adsorção do 2,4-D em solo favorece a sua lixiviação e tem sido relacionado com a presença de matéria orgânica do solo. De acordo com Vieira et al. (1999) baixos teores de MO no solo podem gerar baixa adsorção do herbicida 2,4-D. A adsorção do 2,4-D é relacionada por SINGH (2020) com a alta solubilidade do herbicida em água, pois uma vez dissolvido aumenta o seu potencial de lixiviação e diminui a tendência de adsorção pela parte sólida do solo.

Neste sentido, De Oliveira e Brighenti (2011) consideram que a molécula do herbicida só vai lixiviar se estiver dissolvida na água do solo. E esse processo só não ocorrerá se a molécula estiver retida (adsorvida) à superfície dos colóides minerais (argila) ou orgânicos (matéria orgânica) do solo.

Os resultados do percentual e índice de emergência de plântula do pepino, encontrados e discutidos, sugerem que pode ter ocorrido lixiviação do herbicida 2,4-D até os 40 cm das colunas de solo. Essa possível lixiviação pode estar relacionada à textura arenosa do solo, o baixo teor de Carbono orgânico, matéria orgânica e pH, identificados por Lemos (1973), que interferem na adsorção da molécula do herbicida na fase sólida do solo.

O aumento das lâminas de chuva simulada aumentou o índice de velocidade de emergência, mesmo na presença do herbicida. Pode-se relacionar este resultado a dissolução do herbicida 2,4-D em água, quanto maior a dissolução, menor a concentração da molécula.

5. CONCLUSÃO

Nas condições em que o estudo foi realizado pode ser observada influência na lixiviação do herbicida 2,4-D até os 40 cm de profundidade em Neossolo Litólico com base no percentual de emergência e no índice de emergência de plântula.

A emergência do pepino foi maior nos tratamentos sem o herbicida 2,4-D, independente das variações de lâminas de chuva simulada e das profundidades das colunas. Indicando a presença do herbicida em todas as camadas das colunas de solo. Na presença do herbicida a emergência do bioindicador aumentou com o incremento das lâminas de chuva simuladas. Esse efeito possivelmente foi causado pela menor concentração do herbicida 2,4-D causado pela maior dissolução da molécula.

Considera-se que a maior mobilidade do herbicida 2,4-D em Neossolos, está associada a características dessa classe de solo, como, baixo teor de Carbono orgânico, matéria orgânica e pH e também a solubilidade do herbicida em água. Essas características do solo diminuem a adsorção do herbicida no solo e conseqüentemente influenciam a lixiviação.

Destaca-se a necessidade de mais estudos do comportamento de herbicida 2,4-D e também de outros contaminantes nesta classe de solo, a fim de entender quais as características influenciam mais no comportamento. Principalmente estudos da sorção em Neossolos que é fundamental para entender o comportamento de qualquer substância no solo.

Reforça-se ainda a importância desses estudos por se tratarem das principais fontes das contaminações do solo, recursos hídricos e seres vivos, principalmente de lençóis freáticos.

Ressalta-se que poucos estudos foram encontrados utilizando percentual e índice de velocidade de emergência de plântula para determinação do potencial de lixiviação de defensivos agrícolas. Na sua maioria estavam associados a outras análises como as de fitotoxicidade e não utilizavam o pepino como bioindicador. Essa cultura foi encontrada somente em estudos de fitotoxicidade que não consideraram a emergência de plântula.

Sugere-se que novos estudos sejam realizados utilizando solos com textura arenosa e baixo teor de matéria orgânica para ter melhores relações da lixiviação do 2,4-D nesse tipo de solo, pois em razão de algumas análises não terem sido realizadas, o presente estudo pode ser inconclusivo para determinar o potencial de lixiviação do herbicida 2,4-D em Neossolo Litólico.

Segure-se ainda, que novos estudos sejam desenvolvidos em ambiente controlado e com simulador de chuva automático, para que os parâmetros como velocidade da gota, vazão e pressão sejam mais precisos e possibilitem maiores análises dessa variável.

REFERÊNCIAS

ABNT, NBR. NBR 6502–Rochas e solos. **Rio de Janeiro**, 1995;

Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA. **Monografias Autorizadas**. Disponível em: <http://antigo.anvisa.gov.br/registros-e-autorizacoes/agrotoxicos/produtos/monografia-de-agrotoxicos/autorizadas>. Acesso em: 13 de jun. 2020;

AGRICULTURE ATLAS. 2019. **Facts and figures on EU farming policy**. Heinrich Böll Foundation, Berlin, Germany Friends of the Earth Europe, Brussels, Belgium BirdLife Europe & Central Asia, Brussels, Belgium, p. 72, 2019;

AGROLINK – O Portal do Conteúdo Agropecuário. **Perguntas e respostas sobre 2,4-D**. Disponível em: <https://www.agrolink.com.br/downloads/2,4-D.pdf>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2021;

ALAMGIR, Md. The effects of soil properties on the extent of soil contamination with metals. Environmental remediation Technologies for soil contaminated with metals. **Springer**, Tóquio, 2016;

AMARANTE JUNIOR, O. P.; DOS SANTOS, T. C. R.; BRITO, N. M.; RIBEIRO, M. L. Revisão das propriedades, usos e legislação do ácido 2, 4-Diclorofenoxiacético (2, 4-D). **Cad. Pesq**, v. 13, n. 1, p. 60-70, 2002;

AMARANTE JUNIOR, O.P.; ; BRITO, N. M.; DOS SANTOS, T. C. R.; RIBEIRO, M. L. Estudo da adsorção/dessorção de 2, 4-D em solos usando técnica cromatográfica. **Eclética Química**, v. 27, n. SPE, p. 253-261, 2002;

AMARO, J. A. P.; MOYA, E. G.; QUIROZ, J. F. E.; CARRILLO, A. R. Q.; PÉREZ, J. P.; GARAY, A. H. Análisis de crecimiento, área foliar específica y concentración de nitrógeno en hojas de pasto " mulato" (Brachiaria híbrido, cv.). **Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias**, v. 42, n. 3, p. 447-458, 2004;

ANDRADE, Manoel Jorge Fajardo Villela de. Economia do meio ambiente e regulamentação: análise da legislação brasileira sobre agrotóxicos. **Tese de Mestrado apresentado a Congregação da Escola de Pós-graduação em Economia da Fundação Getúlio Vargas**. Rio de Janeiro, 1995.

ANDRADE, S. P.; ARANTES, S. A. C. M.; ANDRADE, E. A.; PEREIRA, C. S.; FRANCESCHI, M. Leaching of 2, 4-d and atrazine herbicides in red-yellow latosol. **Scientific Electronic Archives**. V. 13, 2020

ANVISA. **Monografias autorizadas de ingredientes ativos**. Brasília, DF, 2019. Disponíveis em: <http://portal.anvisa.gov.br/registros-e-autorizacoes/agrotoxicos/produtos/monografia-de-agrotoxicos/autorizadas>. Acesso em: 15 de abril de 2020;

ARIAS, David Mayorga; MORA, Rosa Elena Guillen; ROMERO, Orlando Segundo Díaz. **Uso de herbicidas en el control de malezas. Importancia de su conocimiento para el profesional agrónomo**. Opuntia Brava, v. 11, n. 1, p. 204-210, 2019;

ARNON, Daniel I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant physiology**, v. 24, n. 1, p. 1, 1949;

BAMBERG, A. L.; GRECCO, M.F.; SILVEIRA, C.A.P.; MARTINAZZO, R.; POTES, M.L.; LOUZADA, R. Uso de colunas de lixiviação para a determinação da dinâmica de liberação de nutrientes a partir de rochas moídas. In: **Embrapa Clima Temperado-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: WORKSHOP INSUMOS PARA AGRICULTURA SUSTENTÁVEL, 2012, Pelotas. Anais... Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2012. 1 CD-ROM., 2012;

BECKER, Elsbeth Léia Spode. Solos do Rio Grande do Sul e sua Relação com o Clima. **Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Produção Vegetal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS)**. Santa Maria. 2008;

BOEGER, Maria Regina Torres; GLUZEZAK, Renata Maria. **Adaptações estruturais de sete espécies de plantas para as condições ambientais da área de dunas de Santa Catarina, Brasil**. Iheringia. Série Botânica., v. 61, n. 1/2, p. 73-82, 2006;

BOIVIN, A.; AMELLAL, S.; SCHIAVON, M.; GENUCHTEN, M. T. 2, 4 - Dichlorophenoxyacetic acid (2, 4-D) sorption and degradation dynamics in three agricultural soils. **Environmental pollution**, v. 138, n. 1, p. 92-99, 2005;

BRASIL. Lei nº 7.802, de 11 de julho de 1989. In: Legislação federal de agrotóxicos e afins. Brasília (DF): **Ministério da Agricultura e do Abastecimento**; 1998. p. 7-13;

BRASIL. Resolução – RDC nº 284, de 21 de maio de 2019. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, ed.97, 22 mai. 2019. Seção 1. p.62;

BRIGHENTI, Alexandre Magno; DE OLIVEIRA, M. F. **Biologia de plantas daninhas**. Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE), 2011;

BRITO, Francisco Emanuel Matos. O admirável mundo sombrio anunciado pela Monsanto. **O olho da história**. Salvador: **O Olho da História**, 2009;

BUENO, Tobias; DE OLIVEIRA, Adriano Rodrigues. 10. AGRONEGÓCIO E AGROTÓXICOS: UM OLHAR SOBRE A AGRICULTURA BRASILEIRA. **REVISANDO PARADIGMAS, CREAMO ALIANZAS**, p. 147, 2014;

CHAIM, A. **Manual de Tecnologia de aplicação de Agrotóxicos**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Brasília, DF, 2009;

CHRISTOFFOLETI, P. J.; OVEJERO, R. F. L.; DAMIN, V.; DE CARVALHO, S. J. P.; NICOLAI, M. Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. **Piracicaba: CP**, v. 2, p. 72, 2009;

DA SILVA, V. M. **Soja como um bioindicador para o estudo do potencial de lixiviação do 2,4-D em Latossolo Vermelho com chuva simulada**. 2017. 103f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) - Faculdade de Agronomia e Zootecnia, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT;

DE OLIVEIRA, E. P.; KUSANO, D. M.; PACHECO, A.; NARDELLI, E. M. V.; DA RUI, R. F.; DA SILVA, M. G.; DA SILVA JUNIOR, C. A. Residual activity of 2, 4-D amine on soybean plant development. **Journal of Agronomy**, v. 14, n. 4, p. 247-250, 2015.

DE OLIVEIRA, Maurílio Fernandes; BRIGHENTI, Alexandre Magno. Comportamento dos herbicidas no ambiente. **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2011;

DE OLIVEIRA JR, Rubem Silvério; INOUE, Miriam Hiroko. **Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas**. Biologia e manejo de plantas daninhas, p. 243, 2011;

DE SOUZA, M. D. Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais. **Embrapa Meio Ambiente. Documentos**, 2004;

DIAS, J. R. M.; DUBBERSTEIN, D.; TAVELLA, L. B.; FERREIRA, E.; STACHIW, R. Lixiviação de 2, 4-D em solo de pastagem na amazônia ocidental. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 7, n. 4, 2012.

DIAS, R. C. dos S.; E SILVA, S. de O.; LEDO, C. A. da S.; RIBAS, R. F. Emergência de plântulas de linhagem elite de mamoeiro comparada com variedades comerciais. In: Embrapa Mandioca e Fruticultura-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA**, 26. 2019, Juazeiro, BA/Petrolina, PE. Fruticultura de precisão: desafios e oportunidades-anais. Petrolina: Embrapa Semiárido: UNIVASF: SBF, 2019;

DONAGEMMA, G. K.; VIANA, J. H. M., VAZ, C.; FONTANA, A. Quantificação de argila e silte em solos de textura leve por diferentes métodos de análise granulométrica. In: **Embrapa Solos-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, 35., 2015, Natal. O solo e suas múltiplas funções: anais. Natal: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015;

DOS SANTOS, S. N.; DIGAN, R. C.; AGUILAR, M. A. G.; SOUZA, C. A. S.; PINTO, D. G.; MARINATO, C. S., ARPINI, T dos S. Análise comparativa de métodos de determinação de área foliar em genótipos de cacau. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3, 2014;

DOS SANTOS BROCHARDT, Viviane; PAULINO, Fernando Oliveira. Direito à informação sobre agrotóxicos no Brasil. In: **Comunicación, sociedad y derechos humanos**. Egregius, 2019. p. 137-154;

DOS SANTOS FERREIRA, Mauricio Tolstoi. O conceito de território usado aplicado a Guerra do Vietnã: técnicas hegemônicas e contra-hegemônicas nas geoestratégias de guerra. **Revista de Geopolítica**, v. 3, n. 2, p. 263-274, 2016;

ENGEL, V. L.; POGGIANI, F. Estudo da concentração de clorofila nas folhas e seu espectro de absorção de luz em função do sombreamento em mudas de quatro espécies florestais nativas. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 3, n. 1, p. 39-45, 1991;

EPA – **Environmental Protection Agency. Reregistration Eligibility Decision for 2,4-D.** Jun. 2005. 304 p;

FAO, GeoNetwork. **Mapa de solos do mundo.** 2012. Disponível em: <http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home>. Acesso em: 12 de abril de 2021.

FIRMINO, Rafaelle Gomes; DA FONSECA, Márcia Batista. Uma visão econômica dos impactos ambientais causados pela expansão da Agricultura. **Análise da Competitividade da Cotonicultura no Estado do Mato Grosso do Sul: Aplicação da Matriz de Análise de Política (MAP)**, p. 32, 2008;

FRANCESCHI, M.; FELITO, R. A.; YAMASHITA, O. M.; LORENZON, J.; DE CARVALHO, M. A. C. Lixiviação do Herbicida 2,4-D + Picloram em Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. **ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.11 n.22; p. 2151, 2015;

FRANCESCHI, M.; YAMASHITA, O. M.; ARANTES, S. A. D. C. M.; ANDRADE, S. P. Comportamento do 2, 4-D + picloram em Latossolo Vermelho Amarelo. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 16, n. 3, p. 238-245, 2017;

GARCIA, Eduardo Garcia; BUSSACOS, Marco Antonio; FISCHER, Frida Marina. Impacto da legislação no registro de agrotóxicos de maior toxicidade no Brasil. **Revista de saúde Pública**, v. 39, n. 5, p. 832-839, 2005;

GÓMEZ, Tenorio; MARCELO, Kleiner. **Efectos de la contaminación del suelo por herbicidas en la productividad del arroz. 2020.** Trabalho de Conclusão de Curso. Babahoyo: UTB, 2020;

GUIMARÃES, GUILHERME LUIZ. Impactos ecológicos do uso de herbicidas ao meio ambiente. **Série técnica IPEF**, v. 4, n. 2, p. 159-180, 1987;

GROVER, R. Mobility of dicamba, picloram and 2, 4-D in soil columns. **Weed Science**, v. 25, n. 2, p. 159-162, 1977;

HITCH, R. K. Pesticide Assessment Guidelines, Subdivision N - Chemistry: Environmental Fate. **US Environmental Protection Agency, Office of Pesticide and Toxic Substances, Washington, DC**, 1982;

IBAMA. **Perfil Ambiental 2,4-D (ácido) CAS 94-75-7.** Perfis Ambientais de agrotóxicos. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <http://ibama.gov.br/agrotoxicos/perfis-ambientais>. Acesso em: 22 de março de 2020;

IBAMA. **Relatórios de consumo de ingredientes ativos de agrotóxicos e afins no Brasil – 2000 – 2014.** Brasília, DF, 2014; Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil 2000-2014. Rio de Janeiro, 2014;

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de pedologia.** 2007;

INOUE, M. H.; MARCHIORI JR., O.; OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN, J.; TORMENA, C. A. Calagem e o potencial de lixiviação de imazaquin em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 20, n. 1, p. 125-132, 2002;

INOUE, M. H.; OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; ALONSO, D. G. Potencial de lixiviação de imazapic e isoxaflutole em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 25, n. 3, p. 547-555, 2007;

INOUE, M. H.; SANTANA, D.C.; OLIVEIRA JR., R. S.; CLEMENTE, R. A.; DALLACORT, R.; POSSAMAI, A. C. S.; SANTANA, C. T. C.; PEREIRA, K. M. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cultura do algodão em colunas de solo. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 825-833, 2010;

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. **Banco de Dados de Informações Ambientais** – versão 2.5.3 de 2020. Disponível em: <https://bdiaweb.ibge.gov.br/#/consulta/pedologia>. Acesso em: 23 de abril de 2020;

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. **Relatórios de comercialização de agrotóxicos**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://ibama.gov.br/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos#boletinsanuais>. Acesso em: 12 de setembro de 2020;

ISMAIL, B. S.; AHMAD, A. R. Attenuation of the herbicidal activities of glufosinate-ammonium and imazapyr in two soils. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 47, n. 4, p. 279-285, 1994;

JAHN, R. et al. **Guidelines for soil description**. FAO, 2006;

JERVAIS, G.; LUUKINEN, B.; BUHL, K.; STONE, D. **National Pesticide Information Center: 2,4-D General Fact Sheet**. Nov. 2008. Disponível em: <http://npic.orst.edu/factsheets/archive/2,4-DTech.html>. Acesso em: 2 de outubro de 2020;

KAH, Melanie; BEULKE, Sabine; BROWN, Colin D. Factors influencing degradation of pesticides in soil. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 55, n. 11, p. 4487-4492, 2007;

LANFER-MARQUEZ, Ursula Maria. O papel da clorofila na alimentação humana: uma revisão. **Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas**, v. 39, n. 3, p. 227-242, 2003;

LEAL, J. F. L.; SILVA, V. F. V.; DOS SANTOS SOUZA, A.; LANGARO, A. C.; SAMPAIO, M. P.; PEREIRA, C. V. L.; DE PINHO, C. F. Leaching potential of the herbicide mixture 2, 4-D+ picloram. **Científica**, v. 48, n. 2, p. 133-138, 2020.

LEITE, Juciara Carvalho. **Estudos laboratoriais de percolação em colunas de misturas de solos lateríticos compactadas: Equipamentos e ensaios**. 2000. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo;

LEMOS, R. C. de. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul. **Embrapa Solos-Séries anteriores (INFOTECA-E)**, 1973.

LONDRES, Flavia. **Agrotóxicos no Brasil: um guia para ação em defesa da vida**. Rede Brasileira de Justiça Ambiental, 2012;

LOURENCETTI, C.; SPADOTTO, C. A.; SANTIAGO-SILVA, M.; RIBEIRO, M. L. Avaliação do potencial de contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: comparação entre métodos de previsão de lixiviação. **Pesticidas: revista de ecotoxicologia e meio ambiente**, v. 15, 2005;

MANZATTO, S. V.; FREITAS JUNIOR, E; PERES, J. R. R. Uso agrícola dos solos no Brasil. **Embrapa Solos**. Rio de Janeiro. 2002;

MAPA – Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento. **Registros de Agrotóxicos concedidos de 2005-2020**. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/agrotoxicos/arquivos/>. Acesso em: 21 de março de 2021;

MARCHI, Giuliano; MARCHI, Edilene Carvalho Santos; GUIMARÃES, Tadeu Graciolli. Herbicidas: mecanismos de ação e uso. **Embrapa Cerrados-Documents (INFOTECA-E)**, 2008;

MARTINS, M. B. F.; DOS SANTOS, A. H. S.; DE CARVALHO, C. T.; AZERÊDO, G. A.; DE OLIVEIRA, F. L. N. Biofertilizante de torta de filtro e bactéria promotora do crescimento em plantas na produção de mudas de alface. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 67758-67768, 2020;

MARTIN, T. N.; MARCHESI, J. A.; DE SOUSA, A. K. F.; CURTI, G. L.; FOGOLARI, H.; DOS SANTOS, V. D. C. Uso do software ImageJ na estimativa de área foliar para a cultura do feijão. **Interciencia**, v. 38, n. 12, p. 843-848, 2013;

MATALLO, Marcus Barifouse et al. Lixiviação dos herbicidas tebutiuron e diuron em colunas de solo. **Pesticidas: revista de ecotoxicologia e meio ambiente**, v. 13, 2003.

MATOS JUNIOR, Élisson de. **Milheto como fitorremediador do glifosato em latossolo vermelho**. 2019. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Agrárias e Tecnológicas, Rondonópolis, 2019;

MAXWEL, C. O.; PEREIRA, G. A. M.; TAKANO, H.; NUNES, A. L.; REIS, M. R. dos. **Combinações de Herbicidas no Brasil**. Versão I - Abril 2020. Disponível em: https://maxweeds.rbind.io/post/chart/Chart_Herbicida_Alf.pdf. Acesso em: 12 de fevereiro de 2021;

MELLO, Fabíola de Azevedo. **Efeito mutagênico da exposição aguda e crônica ao herbicida ácido 2,4-diclorofenóxiacético (2,4-D)**. 2020. 89f. Tese (Doutorado em Fisiopatologia e Saúde Animal) - Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2020;

MONTEBELLER, C. A.; CARVALHO, D. F. D.; ALVES SOBRINHO, T.; NUNES, A. C. da S.; RUBIO, E. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.5, n.1, p.1-5, 2001;

MUNZUROGLU, O.; GECKIL, HİKMET. Effects of metals on seed germination, root elongation, and coleoptile and hypocotyl growth in *Triticum aestivum* and *Cucumis sativus*. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 43, n. 2, p. 203-213, 2002;

NENE, Y. L. Significant milestones in evolution of agriculture in the world. **Asian Agricultural History**, v. 16, p. 219-35, 2012;

NORTOX. 2,4-D. JIAMUSI HEILONG AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL CHEMICAL LTD, 2017. **Bula de herbicida**;

OKUYAMA, Lauro Akio; DA SILVA, Paulo Regis Ferreira. Aplicação de nitrogênio e 2, 4-D como regulador de crescimento em milho I. Acúmulo de matéria seca e rendimento de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 18, n. 6, p. 613-618, 1983;

OLIVEIRA, A.C.S.; MARTINS, G.N.; SILVA, R.F.; VIEIRA, H.D. Teste de vigor em sementes baseados no desempenho de plântulas. **Inter Science Place**, v.2, n. 4. 21p. 2009;

PEREIRA, G. A. M.; BARCELLOS JR, L. H.; GONÇALVES, V. A.; SILVA, D. V.; SILVA, A. A. Clomazone Leaching Estimate in Soil Columns Using the Biological Method. **Planta Daninha**, v. 35, 2017;

PERES-OLIVEIRA, M. A.; SILVA, E. M. B.; DA SILVA, V. M.; DA SILVA, T. J. A.; SOUSA, H. H. de F. Soybean as bioindicator of residual effect of 2, 4-D herbicide in an oxisol from the Brazilian cerrado. **Afr J Agr Res**, v. 12, n. 1, p. 35-41, 2017;

PIGNATI, W. A.; LIMA, F. A. N. D. S.; LARA, S. S. D.; CORREA, M. L. M.; BARBOSA, J. R.; LEÃO, L. H. D. C.; PIGNATTI, M. G. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, p. 3281-3293, 2017;

PINHEIRO, G. H. R. **Hormesis na cultura da soja em resposta à aplicação de 2,4-D sal colina**. 2020. 52 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Produção Vegetal) - Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2020;

PIRES, A. M.M.; OLIVEIRA, A. R.; FILIZOLA, H. F.; DE QUEIROZ, J. F.; DE SOUZA, M. D.; GOMES, M. A. F.; LIGO, M. A. V.; SILVEIRA, M. P.; GHINI, R.; BOEIRA, R. C.; DE QUEIROZ, S. C. N.; FREITAS, S. dos S.; FERRACINI, V. L. **Manual de Procedimentos de coleta de Amostras em Áreas Agrícolas para análise da qualidade Ambiental: Solo, Água e Sedimentos**. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúma, SP, 2006;

SANTOS, D. P. D.; BRAGA, R. R.; GUIMARÃES, F. A. R.; PASSOS, A. B. R. D. J.; SILVA, D. V.; SANTOS, J. B. D.; NERY, M. C. Determinação de espécies bioindicadoras de resíduos de herbicidas auxínicos. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 354-362, 2013.

SANTOS, R. D.; DE LEMOS, R. C.; DOS SANTOS, H. G.; KER, J. C.; DOS ANJOS, L. H. C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5ª edição. **Revista e ampliada. Viçosa-MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2005;

SAMPAIO, S. C.; CAOVILO, F. A.; OPAZO, M. A.; NÓBREGA, L. H.; SUSZEK, M.; SMANHOTTO, A. Lixiviação de íons em colunas de solo deformado e indeformado. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 150-159, 2010;

SARTO, M. V. M.; INAGAKI, A. M.; DIAMANTE, M. S.; DALASTRA, G. M.; GUSATTO, F. C.; GUIMARÃES, V. F.; RAMPIM, L. QUALIDADE FISIOLÓGICA DE SEMENTES DE MILHO SUBMETIDO À BIOESTIMULANTE E INOCULAÇÃO DE BACTÉRIAS DIAZOTRÓFICAS. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.3, n.1, p.146-157, 2014;

SBANO, A.; FERREIRA, J. V. R.; PECKLE, B. A.; MACRAE, A.; DIREITO, I. C. N. Otimização de método cromatográfico para quantificação do herbicida ácido 2, 4-Diclorofenoxiacético (2,4-D). **AS&T ACTA SCIENTIAE E TECHNICA**, v. 1, p. 37-46, 2013;

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E DESENVOLVIMENTO RURAL (Rio Grande do Sul). INSTRUÇÃO NORMATIVA SEAPDR n° 15/2019, de 4 de dezembro de 2019.. **Diário Oficial [do] Estado do Rio Grande do Sul**. p. 151-152, 04 dez. 2019;

SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E.; AMORIM, R. S.; PAIVA, K. W. Efeito da cobertura nas perdas de solo em um Argissolo Vermelho-Amarelo utilizando simulador de chuva. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 2, p. 409-419, 2005;

SILVA, D. R. O. da; CUCHI, M. L.; DA SILVA, ÁLVARO A. A.; NOVELLO, B. D.; BASSO, C. J. Chuva simulada após aplicação de 2,4-D e dicamba na pré-semeadura de soja. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 50, p. e62780, 28 set. 2020;

SILVA, F. M. L.; CAVALIERI, S. D.; SÃO JOSÉ, A. R.; ULLOA, S. M.; VELINI, E. D. Atividade residual de 2, 4-D sobre a emergência de soja em solos com texturas distintas. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, n. 1, p. 29-36, 2011;

SINGH, H.; SINGH, D.; KUMAR, A.; SHARMA, A.; MAITHANI, D.; SINGH, M. C. BIODEGRADATION OF PESTICIDES IN SOIL-A REVIEW. *International Journal of Science, Environment and Technology*. Vol.9. pag 705-718. Published Aug, 2020;

SOARES, Wagner Lopes; PORTO, Marcelo Firpo. Atividade agrícola e externalidade ambiental: uma análise a partir do uso de agrotóxicos no cerrado brasileiro. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 12, n. 1, p. 131-143, 2007;

SOIL SCIENCE DIVISION STAFF. Soil survey manual. **Handbook 18**, 2017;

SOLOS, Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed., rev. e ampl. Brasília (DF), 2018;

SONG, Yaling. Insight into the mode of action of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) as an herbicide. **Journal of integrative plant biology**, v. 56, n. 2, pág. 106-113, 2014;

SOUZA, A. P.; FERREIRA, F. A.; DA SILVA, A. A.; RUIZ, H. A.; PRATES, H. T. Lixiviação de glyphosate e imazapyr em solos com diferentes texturas e composição química: I-Método do Bioensaio. **Planta Daninha**, p. 5-16, 2000;

SOUZA, Murilo Mendonça Oliveira de; FOLGADO, C. A. Agrotóxicos: violações socioambientais e direitos humanos no Brasil. **Anápolis: UEG**, 2016;

SPADOTTO, Cláudio A.; MATALLO, Marcus B.; GOMES, Marco Antonio F. Sorção do herbicida 2, 4-D em solos brasileiros. **Embrapa Meio Ambiente-Artigo em periódico indexado (ALICE)**, 2003.

SPARK, K. M.; SWIFT, R. S. Effect of soil composition and dissolved organic matter on pesticide sorption. **Science of the Total Environment**, v. 298, n. 1-3, p. 147-161, 2002;

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. Manual de métodos de análise de solo. **Rio de Janeiro**, v. 4, 2017;

THOMÉ, A; KNOP, A. Movimento de contaminantes no solo. **Comitê Rio Passo Fundo**. 2007.

UPCHURCH, Robert P. Behavior of herbicides in soil. In: **Residue Reviews/Rückstands-Berichte**. Springer, New York, NY, 1966. p. 46-85;

US-EPA. United States Environmental Protection Agency. **Ecological effects test guidelines**. OPPTS 850.4200. Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test. EPA 712-C-96-154, 1996;

VIEIRA, E. M.; PRADO, A. D.; LANDGRAF, M. D.; REZENDE, M. D. O. Estudo da adsorção/dessorção do ácido 2, 4 diclorofenoxiacético (2, 4d) em solo na ausência e presença de matéria orgânica. **Química Nova**, v. 22, n. 3, p. 305-308, 1999;

VILLAR, M. L. P. **Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação**. EMPAER-MT, 2007;

WANG, Wuncheng. Literature review on higher plants for toxicity testing. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 59, n. 3-4, p. 381-400, 1991;

WANG, Wuncheng; WILLIAMS, Judson M. The use of phytotoxicity tests (common duckweed, cabbage, and millet) for determining effluent toxicity. **Environmental monitoring and assessment**, v. 14, n. 1, p. 45-58, 1990;

WANG, X.; SUN, C.; GAO, S.; WANG, L.; SHUOKUI, H. Validation of germination rate and root elongation as indicator to assess phytotoxicity with *Cucumis sativus*. **Chemosphere**, v. 44, n. 8, p. 1711-1721, 2001;

WARNOCK, John W.; LEWIS, Jay. Political Ecology of 2, 4-D. **Alternatives**, v. 10, n. 2, p. 33-39, 1982;

YARON, B.; GERSTL, Z.; SPENCER, W. F. Behavior of herbicides in irrigated soils. In: **Advances in soil science**. Springer, New York, NY, 1985. p. 121-211.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Percentual de emergência nas colunas com 2,4-D e 80 mm de chuva simulada.

DAS	Profundidade das colunas (cm)											
	Replica 1				Replica 2				Replica 3			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0
7	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	1
8	0	0	0	-	1	0	1	-	0	0	3	-
9	0	0	0	-	-	0	-	-	0	0	-	-
10	1	0	0	-	-	0	-	-	0	0	-	-
11	-	1	1	-	-	1	-	-	0	0	-	-
NTS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
NSG	1	1	1	2	1	1	1	1	0	0	3	1
%E	33,33	33,33	33,33	66,67	33,33	33,33	33,33	33,33	0	0	100	33,33

Fonte: autora (2021).

Legenda: Dias após a semeadura (DAS), número total de sementes em cada unidade experimental (NTS), número de sementes germinadas em cada unidade experimental (NSG) e percentual de emergência de plântula (%E).

APÊNDICE 2 – Percentual de emergência nas colunas com 2,4-D e 40 mm de chuva simulada.

DAS	Profundidade das colunas (cm)											
	Replica 1				Replica 2				Replica 3			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	2	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0
10	0	-	0	0	0	-	0	-	0	0	0	0
11	0	-	1	1	0	-	0	-	0	0	0	0
NTS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
NSG	0	2	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0
%E	0	66,67	33,33	33,33	0	33,33	0	33,33	0	0	0	0

Fonte: autora (2021).

Legenda: Dias após a semeadura (DAS), número total de sementes em cada unidade experimental (NTS), número de sementes germinadas em cada unidade experimental (NSG) e percentual de emergência de plântula (%E).

APÊNDICE 3 – Percentual de emergência nas colunas com 2,4-D e 0 mm de chuva simulada.

DAS	Profundidade das colunas (cm)											
	Replica 1				Replica 2				Replica 3			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	-	0	-	-	0	0	0	0	0
11	0	0	0	-	0	-	-	0	0	0	0	0
NTS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
NSG	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
%E	0	0	0	33,33	0	33,33	0	33,33	0	0	0	0

Fonte: autora (2021).

Legenda: Dias após a semeadura (DAS), número total de sementes em cada unidade experimental (NTS), número de sementes germinadas em cada unidade experimental (NSG) e percentual de emergência de plântula (%E).

APÊNDICE 4 – Percentual de emergência nas colunas sem 2,4-D e 80 mm de chuva simulada.

DAS	Profundidade das colunas (cm)											
	Replica 1				Replica 2				Replica 3			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	2	2	-	1	1	2	3
8	0	0	3	0	0	-	-	-	-	-	-	-
9	0	0	-	3	0	-	-	-	-	-	-	-
10	0	0	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-
11	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NTS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
NSG	1	1	3	3	1	2	2	3	1	1	2	3
%E	33,33	33,33	100	100	33,33	66,67	66,67	100	33,33	33,33	66,67	100

Fonte: autora (2021).

Legenda: Dias após a semeadura (DAS), número total de sementes em cada unidade experimental (NTS), número de sementes germinadas em cada unidade experimental (NSG) e percentual de emergência de plântula (%E).

APÊNDICE 5 – Percentual de emergência nas colunas sem 2,4-D e 40 mm de chuva simulada.

DAS	Profundidade das colunas (cm)											
	Replica 1				Replica 2				Replica 3			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
8	-	2	0	0	2	0	1	0	-	1	1	0
9	-	-	0	1	-	0	-	1	-	2	-	1
10	-	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-
11	-	-	0	-	-	0	-	-	-	-	-	-
NTS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
NSG	1	2	0	1	2	0	1	1	1	3	1	1
%E	33,33	66,67	0	33,33	66,67	0	33,33	33,33	33,33	100	33,33	33,33

Fonte: autora (2021).

Legenda: Dias após a semeadura (DAS), número total de sementes em cada unidade experimental (NTS), número de sementes germinadas em cada unidade experimental (NSG) e percentual de emergência de plântula (%E).

APÊNDICE 6 – Percentual de emergência nas colunas sem 2,4-D e 0 mm de chuva simulada.

DAS	Profundidade das colunas (cm)											
	Replica 1				Replica 2				Replica 3			
	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40	0-10	10-20	20-30	30-40
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	-	0	0	0	0	0	0	0	-	0
11	1	0	-	0	0	1	0	0	1	1	-	0
NTS	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
NSG	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0
%E	33,33	0	33,33	0	0	33,33	0	0	33,33	33,33	33,33	0

Fonte: autora (2021).

Legenda: Dias após a semeadura (DAS), número total de sementes em cada unidade experimental (NTS), número de sementes germinadas em cada unidade experimental (NSG) e percentual de emergência de plântula (%E).

APÊNDICE 7 – Resumo da análise de variância.

Fontes de Variação	Graus de liberdade	IVE		%E	
		Valo-p	Resumo	Valor-p	Resumo
Herbicida (H)	1	0.0945	ns	0.0783	ns
Lâminas (L)	3	0.1250	ns	0.0659	ns
Profundidade (Z)	4	0.2078	ns	0.0592	ns

Fonte: autora (2021).