

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL

LIXIVIAÇÃO E SORÇÃO DE DIURON EM SOLOS CULTIVADOS COM CITROS

OLOUKEMI KARMEN JOCELYNE ADJERAN

MANAUS, AM

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA TROPICAL

OLOUKEMI KARMEN JOCELYNE ADJERAN

**LIXIVIAÇÃO E SORÇÃO DE DIURON EM SOLOS CULTIVADOS COM
CITROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia Tropical.

Orientador: Prof. Dr. José Ferreira da Silva

MANAUS-AM

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

A235l Adjcran , Oloukemi Karmen Jocelyne
Lixiviação e sorção de diuron em solos cultivados com citros /
Oloukemi Karmen Jocelyne Adjcran . 2023
54 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: José Ferreira da Silva
Dissertação (Mestrado em Agronomia Tropical) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. comportamento do herbicida. 2. retenção. 3. mobilidade. 4.
bioensaio. I. Silva, José Ferreira da. II. Universidade Federal do
Amazonas III. Título

OLOUKEMI KARMEN JOCELYNE ADJERAN

Lixiviação e sorção de diuron em solos cultivados com citros

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Agronomia Tropical.

Aprovada em 28 de julho de 2023

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. José Ferreira da Silva

Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

Documento assinado digitalmente

 GERLANDIO SUASSUNA GONCALVES
Data: 22/08/2023 12:20:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gerlândio Suassuna Gonçalves

Universidade Federal do Amazonas (UFAM-Itacoatiara)

Documento assinado digitalmente

 ANGELA MARIA DA SILVA MENDES
Data: 23/08/2023 13:01:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Ângela Maria da Silva Mendes

Universidade Federal do Amazonas (UFAM)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Emmanuel Adjeran e Catherine Bonin Aka, que nunca mediram esforços para minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. José Ferreira da Silva, pela orientação, dedicação, ensinamento, paciência, incentivo e principalmente, pela oportunidade e confiança depositadas em mim por todos esses anos.

Ao prof. Dr. Agno Nonato pela ajuda na coleta das amostras de solo.

Ao Laboratório de Ciências das Plantas Daninhas, pelo acolhimento e receptividade.

A toda minha família, que sempre me incentivou e encorajou durante a minha trajetória, em especial aos meus pais e irmãos.

À minha amiga Giulia Sanches pelo incentivo, motivação, empenho e colaboração na condução do experimento, sendo fundamental ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus amigos Abdel Fadyl e Olendina Salviano pelo incentivo, apoio e amizade.

Às equipes do Laboratório de Gênese e Mineralogia do Solo e do LEA da Universidade Federal do Amazonas por disponibilizarem o deionizador e por todo o suporte fornecido durante a execução desta pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia Tropical (PPGATR - UFAM), pela oportunidade e contribuição à minha carreira.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas-FAPEAM- pelo financiamento do projeto de pesquisa em citros: Avaliação de novas combinações de copas/porta-enxertos, manejo fitossanitário e boas práticas de cultivo, em citros no Estado do Amazonas.

Aos produtores de citros que apoiaram a realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento da bolsa de estudos.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho deixo aqui expresso meu muito obrigada!

RESUMO

A compreensão do comportamento dos herbicidas no solo pode contribuir para determinar as doses e o momento adequado de aplicação para um controle eficiente de plantas daninhas e menos impacto ambiental. O objetivo deste trabalho foi avaliar o movimento e a sorção do herbicida diuron, em solos de dois pomares de citros no estado do Amazonas. Dois experimentos foram instalados com as amostras de solos coletadas nos pomares cítricos nos municípios de Iranduba e Rio Preto da Eva. Os experimentos foram em casa de vegetação com a metodologia de bioensaios com pepino (*Cucumis sativus* var. Aodai) como planta bioindicadora. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com 4 repetições e cinco doses de diuron (0, 500, 1000, 2000, 4000 g ha⁻¹ de i.a.) em cada tipo de solo. O primeiro experimento constituiu na estimativa da sorção do herbicida pelos solos em doses crescentes de diuron aplicadas nos dois solos. Além da avaliação da sorção se fez o mesmo experimento em areia lavada com nove doses de diuron (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 g ha⁻¹ de i.a.) para avaliar a dose do herbicida em substrato inerte que inibiu 50% do crescimento da planta-teste. Após a aplicação do herbicida foi semeado o pepino. Aos 14 dias após a semeadura realizou-se o corte da planta bioindicadora e foi determinado o peso da matéria seca, bem como a dose necessária para causar 50% de redução da matéria seca (I₅₀). Com esses dados calculou-se a relação de sorção (RS) do diuron com o I₅₀ de cada solo, com o I₅₀ obtida na areia lavada. No experimento de lixiviação foram utilizadas colunas de PVC preenchidas com solo conforme a profundidade de coleta no campo (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm). No topo das colunas foram aplicadas as diferentes doses de diuron e foi simulada uma chuva de 150 mm. Após 72 horas foi semeada a planta bioindicadora, para verificar presença do herbicida nas diferentes profundidades do solo dentro da coluna de PVC. As avaliações de fitotoxicidade foram aos 7 e 14 dias após a semeadura (D.A.S.). A matéria seca da parte aérea do pepino foi avaliada aos 14 D.A.S. O maior valor da sorção (60,70) foi obtido no solo coletado no pomar de Rio Preto da Eva, que apresentou maior capacidade de troca catiônica e maior teor de matéria orgânica. O diuron promoveu fitotoxicidade e reduziu a matéria seca das plântulas de pepino até a profundidade de 40 cm. Isto indica que este herbicida possui alto potencial de lixiviação nos solos desses pomares. Com o aumento das doses de diuron houve redução do peso da matéria seca da planta-teste nos dois experimentos. Portanto, há uma relação entre os atributos físico-químicos, a dose aplicada do herbicida e os processos de sorção e lixiviação nos solos estudados.

Palavras-chave: comportamento do herbicida, retenção; mobilidade; bioensaio.

ABSTRACT

Understanding the behavior of herbicides in the soil can help determine the doses and the appropriate timing of application for efficient weed control and less environmental impact. The objective of this work was to Evaluate the movement and sorption of the herbicide diuron, in soils of two citrus orchards in the state of Amazonas. Two experiments were installed with the soil samples collected from citrus orchards in the municipalities of Iranduba and Rio Preto da Eva. The experiments were conducted in a greenhouse using the bioassay method with cucumber (*Cucumis sativus* var. Aodai) as a bioindicator plant. The experimental design was completely randomized with four replicates and five doses of diuron (0, 500, 1000, 2000, 4000 g ha⁻¹ de i.a.) in each soil type. The first experiment consisted of estimating the sorption of the herbicide by the soils at increasing doses of diuron applied to the two soils. In addition to the sorption Evaluation, the same experiment was performed on washed sand with nine doses of diuron (0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 g ha⁻¹ de i.a.) to Evaluate the herbicide dose in inert substrate that inhibited 50% of the test plant growth. After herbicide application, the cucumber was sown. At 14 days after sowing, the indicator plant was cut and the dry matter weight and the dose required to cause a 50% reduction in the dry matter of the cucumber seedlings (I₅₀) were determined. From these data, the sorption ratio (SR) of diuron was calculated using the I₅₀ of each soil and the I₅₀ obtained in the washed sand. In the leaching experiment, PVC columns filled with soil were used according to the depth of sampling in the field (0-10, 10-20, 20-30, 30-40 cm). The different doses of diuron were applied to the top of the columns and a rainfall of 150 mm was simulated. After 72 hours, the bioindicator plant was sown to verify the presence of the herbicide in the different soil depths within the column. Phytotoxicity Evaluations were performed at 7 and 14 days after sowing (D.A.S.). The dry matter accumulation of the aerial part of the cucumber was Evaluated at 14 D.A.S. The highest SR value (60,70) was obtained in the soil of Rio Preto da Eva, which was the soil with the highest Cation Exchange Capacity (CEC) and higher organic matter and clay content. diuron promoted phytotoxicity and dry matter reduction in cucumber seedlings to a depth of 40 cm with leaching potential in the soils of both orchards. With increasing doses of diuron, there was a reduction in the dry matter weight of the test plant in both experiments. Therefore, there is a relationship between the physicochemical properties, the dose applied and the sorption and leaching processes in the soils studied.

Keywords: herbicide behavior, retention; mobility; bioassay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fórmula estrutural do herbicida diuron.....	25
Figura 2. Mapa das áreas de coleta dos substratos.	27
Figura 3. Esquema visual da montagem do experimento de sorção: solo (A), areia (B).	28
Figura 4. Coluna de PVC- Unidade experimental.....	30
Figura 5. Sintomas de fitotoxicidade nas plântulas de pepino causados pelo herbicida diuron.	33
Figura 6. Porcentagens do peso da matéria seca acumulada pelas plântulas de pepino em função das doses de diuron em areia lavada.....	36
Figura 7. Fitotoxicidade de diferentes doses de diuron (g ha^{-1} de i.a.) em pepino no substrato de areia lavada.	37
Figura 8. Porcentagens do peso da matéria seca acumulada pelas plântulas de pepino em função das doses de diuron no solo de Rio Preto da Eva (A) e Iranduba (B).	37
Figura 9. Fitotoxicidade de diferentes doses (g h^{-1} de i.a.) de diuron em pepino nos solos de Rio Preto da Eva (A) e Iranduba (B).	38
Figura 10. Acúmulo de matéria seca da plântula de pepino em relação à testemunha, em diferentes profundidades.....	42
Figura 11. Lixiviação do diuron em solo cultivado com citros, coletados em quatro profundidades e submetidos a cinco doses de diuron.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características físico-químicas das amostras de solos de dois pomares de citros no Amazonas.	28
Tabela 2. Escala de avaliação visual de fitotoxicidade de herbicidas sobre das plantas.	31
Tabela 3. Resumo da análise de variância (ANOVA) para o peso da matéria seca da parte aérea de plântulas de pepino semeadas em solos cultivados com citros, Manaus, 2023.	33
Tabela 4. Médias do peso da matéria seca das plântulas de pepino em solos cultivados com citros. Manaus, 2023.	34
Tabela 5. Valores de I50, razão de sorção (RS), matéria orgânica e sorção do diuron pela matéria orgânica, em areia e solos, Manaus, 2023.	39
Tabela 6. Resumo da análise de variância para peso da matéria seca de pepino semeado em solos de área cultivada citros, Manaus, 2023.	40
Tabela 7. Médias do peso seco da plântula de pepino em solos cultivados com citros, coletados em quatro profundidades, Manaus, 2023.	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
B	Boro
Ca	Cálcio
CaCl ₂	Cloreto de cálcio
°C	Graus Celsius
cm	Centímetro
Cmolc.dm ³	Centimol de carga por decímetro cúbico
CTC	Capacidade de troca de catiônica
Cu	Cobre
Fe	Ferro
g	Gramma
g.ha ⁻¹	Gramma por hectare
g. kg ⁻¹	Gramma por quilograma
H + Al	Acidez potencial
i.a.	Ingrediente ativo
Kow	Constante de partição octanol-água
Koc	Constante de sorção normatizada
M	Molar
m	Saturação por alumínio
Mg	Magnésio
mg.dm ⁻³	miligramas por decímetro cúbico
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mn	Manganês
M.O	Matéria orgânica
P	Fósforo
R ²	Coeficiente de determinação
SB	Soma de bases
V	Saturação por bases
Zn	Zinco
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Objetivo geral	16
2.2. Objetivos específicos	16
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	17
3.1. Citricultura e manejo das plantas daninhas	17
3.2. Dinâmica de herbicidas no solo	18
3.2.1. Sorção	18
3.2.2. Lixiviação	19
3.3. Fatores que influenciam o comportamento do herbicida no solo	20
3.3.1. Propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo	21
3.3.2. Propriedades físico-químicas do herbicida	23
3.4. Características do herbicida diuron.....	24
4. MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1. Sorção do herbicida diuron em solos cultivados com citros.....	27
4.1.1. Coletas das amostras	27
4.1.2. Aplicação e avaliação dos efeitos dos herbicidas em substratos	29
4.2. Lixiviação do diuron.....	30
4.3. Análise estatística	31
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1. Sorção do herbicida diuron.....	33
5.2. Potencial de lixiviação do diuron	40
6. CONCLUSÕES	47
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1. INTRODUÇÃO

O controle das plantas daninhas na citricultura representa um fator importante na cadeia de produção, uma vez que essas plantas competem com a cultura por recursos essenciais como água, nutrientes e luz, o que pode resultar na redução do tamanho das plantas, quantidade e qualidade dos frutos e no aumento do custo de produção (Martinelli *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, o manejo de plantas daninhas em pomares de citros é feito com o uso de herbicida devido à alta eficiência de controle, facilidade de uso e uma boa relação custo-benefício (Martinelli *et al.*, 2017). No entanto, apesar das vantagens que esse método apresenta, sua aplicação sem o devido conhecimento das interações com o solo e o clima, pode ocasionar falhas no controle de plantas daninhas, fitotoxicidade das culturas de interesse, redução da biodiversidade, além de contaminação do solo e das águas (Passos *et al.*, 2019).

No Brasil existem 32 ingredientes ativos registrados para uso em pós e pré- emergência de plantas daninhas nos pomares de citros, dentre eles o diuron (MAPA, 2023). O diuron [3-(3,4-dichlorophenyl) -1,1- dimethylurea] é um herbicida residual de amplo espectro, registrado para o controle de plantas daninhas de folha larga e gramíneas anuais e perenes (Rodrigues e Almeida, 2018; PPDB, 2023). Devido ao uso constante nas áreas de produção, ao seu alto efeito residual e a alta persistência no solo, o diuron é visto como uma ameaça potencial para a contaminação de águas superficiais e subterrâneas, o que gera muitas preocupações (EL-NAHHAL *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2019). Portanto, torna-se importante entender os processos que determinam a mobilidade, a retenção e taxa de degradação desse herbicida no intuito de reduzir os riscos de contaminação ambiental (Guimarães *et al.*, 2018; Pavão *et al.*, 2021).

Quando um herbicida é aplicado, além de ser absorvido também pelas plantas cultivadas, pode sofrer diversos processos de transformação (degradação), transporte (lixiviação) e retenção (sorção/dessorção) no solo. Esses processos são influenciados pelas propriedades físicas e químicas do solo, (matéria orgânica, composição mineralógica, potencial hidrogeniônico (pH), capacidade de troca de catiônica (CTC) e umidade), pelas propriedades do herbicida (pressão de vapor (P), solubilidade em água (Sw); coeficiente de partição octanol-água (Kow), constante de dissociação ácido (pKa)), e pelas condições climáticas (quantidade e intensidade de chuva) (Mendes *et al.*, 2016; Monquero e Silva, 2021; Silva *et al.*, 2022).

Por serem processos cruciais na determinação do comportamento do herbicida no solo, conhecer as características de sorção e lixiviação solo pode auxiliar na determinação das taxas

e os momentos adequados de aplicação do herbicida. A sorção afeta a disponibilidade do herbicida na solução do solo, o que reduz a quantidade de produto disponível para o controle das plantas daninhas (Faria *et al.*, 2018; Pavão *et al.*, 2021). Além disso, exerce influência na mobilidade do produto, logo, na persistência no solo. Quando herbicidas com alta persistência são aplicados em solos com baixa capacidade de sorver compostos, o risco de contaminação por esses produtos pode ser elevado (El-Nahal *et al.*, 2017).

A lixiviação está relacionada ao movimento dos herbicidas pelo perfil do solo, sendo a água da chuva ou de irrigação o principal meio de carregamento desses compostos (Guerra *et al.*, 2016). Trata-se de um meio importante para a incorporação superficial dos herbicidas, a fim de atingir o banco de sementes, mas se torna um fator preocupante quando ocorre em excesso, pois o herbicida pode atingir as reservas de água subterrânea e causar contaminação (Silva *et al.*, 2019; Bandeira *et al.*, 2022).

O estudo do comportamento do herbicida no solo é essencial para o desenvolvimento de estratégias de gerenciamento eficazes que minimizem o impacto ambiental e que mantenham um controle eficiente das plantas daninhas. Daí a importância de estudos para avaliar o comportamento de herbicidas no ambiente através de experimentos sobre os processos de sorção e transporte de herbicidas no solo de forma isolada. Entender melhor os mecanismos e elementos envolvidos nas interações entre herbicida e solo permite melhorar a seleção de herbicidas, as práticas de aplicação e os modelos de avaliação de risco.

Considerando o amplo uso do diuron em pomares de citros e os poucos estudos sobre seu comportamento nessas áreas, este trabalho teve como objetivo avaliar o movimento e a sorção do herbicida diuron em solos cultivados com citros em dois municípios do estado do Amazonas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar o movimento e a sorção do herbicida diuron, em solos de dois pomares de citros no estado do Amazonas.

2.2. Objetivos específicos

estimar as quantidades sorvidas de diuron pelos solos cultivados com citros;

Determinar a dose de diuron que reduziu 50% do peso da matéria seca da planta- teste;

Avaliar o potencial de lixiviação do diuron nos solos cultivados com citros.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Citricultura e manejo das plantas daninhas

A citricultura brasileira representa uma das mais importantes cadeias produtivas do agronegócio do país. Segundo os dados do Departamento de Agricultura dos estados Unidos, em 2021 o Brasil foi responsável por cerca de 34% da produção mundial de laranjas e de 63% da produção mundial de suco concentrado (USDA, 2023). A alta produtividade dos citros e principalmente de laranja no Brasil é resultado das melhores condições de desenvolvimento da planta e de investimentos massivos em pesquisa aplicada, realizada ao longo de várias décadas, principalmente no polo citrícola do estado de São Paulo, responsável por mais de 75% da produção nacional de laranja (Rebello *et al.*, 2022).

Na região Norte, a citricultura tem apresentado índices ascendentes de crescimento. Fatores como condições edafoclimáticas adequadas, a instalação de indústrias para o processamento de frutos e áreas livres de cancro-cítrico, greening, pinta-preta e morte-súbita contribuíram para a expansão da citricultura na região (Pinheiro *et al.*, 2019; Rebello *et al.*, 2022). Os principais produtores são os estados do Pará e do Amazonas com 1,9% e 0,3% da produção nacional, respectivamente, em 2020. entretanto, ainda existem fatores limitantes ao crescimento da citricultura e ao aumento de produtividade, como solos pobres em nutrientes, a elevada biodiversidade, baixo nível tecnológico, o manejo inadequado de pragas, doenças e plantas daninhas (Carvalho *et al.*, 2019; Pinheiro *et al.*, 2019).

A interferência das plantas daninhas em pomares cítricos pode reduzir o tamanho das plantas, a quantidade e a qualidade dos frutos (Martinelli *et al.*, 2022). Segundo Gonçalves *et al.* (2018), a interferência das plantas daninhas pode diminuir a quantidade de frutos por planta de laranja em até 28 %, no estado do Amazonas. estudos realizados por Martinelli *et al.* (2017) e Azevedo *et al.* (2020) em pomares de lima ácida ‘tahiti’ mostraram que a competição das plantas pode reduzir de 52% a 88 % a produção dos pomares.

Diversos métodos são utilizados para o controle de plantas daninhas na citricultura, porém o uso de herbicidas aplicados em pré ou pós emergência é o mais usado, em razão do alto custo de mão-de-obra para controles mecânicos, do melhor custo-benefício e da alta eficácia dos herbicidas quando aplicados de forma adequada (Martinelli *et al.*, 2017). Portanto para ter sucesso no controle químico das plantas daninhas, conhecer as propriedades físico-químicas e a dose do herbicida, as condições do ambiente no momento e após a aplicação, e características físico-químicas do solo para os herbicidas aplicados em pré-emergência é de relevante importância (Pavão *et al.*, 2021).

3.2. Dinâmica de herbicidas no solo

Após a pulverização, os herbicidas podem passar por séries de processos ou fenômenos que podem elevar as perdas, intoxicação ou poluição ambiental tais como: processos de retenção (adsorção, absorção, precipitação e partição hidrofóbica), de transformação (degradação e mineralização) e de transporte (deriva, volatilização, lixiviação e escoamento superficial). esses processos podem ocorrer de forma isolada ou combinado com diferentes intensidades (Correia, 2018; Monquero e Silva, 2021).

3.2.1. Sorção

A sorção é a capacidade do solo de reter ou adsorver as moléculas ou íons em suas camadas mais superficiais. A sorção de herbicidas envolve processos hidrofóbicos, físicos e químicos, em que a molécula do herbicida se liga à superfície dos coloides minerais ou orgânicos, reduzindo a disponibilidade para absorção pelas plantas e diminuindo sua mobilidade no perfil do solo (Silva *et al.*, 2014; Faria *et al.*, 2018). A sorção influencia os processos de transporte e transformação do herbicida no solo, determina a persistência, disponibilidade para as plantas e seu potencial de causar danos a organismos não-alvo. (Porfiri *et al.*, 2015; Pavão *et al.*, 2021). Quando sorvido, o herbicida pode sofrer o processo de dessorção, que é o retorno para a solução do solo, do produto anteriormente sorvido. este processo também é importante para determinar a quantidade do herbicida disponível para as espécies-alvo (Sondhia e Khare 2014).

A intensidade da sorção é influenciada pelas características físicas, químicas e mineralógicas do solo como: textura, potencial hidrogeniônico (pH), tipo de argila, capacidade de troca catiônica, teor de carbono orgânico, matéria orgânica (Azcarate *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2022) e pelas propriedades físico-químicas do herbicida como a solubilidade em água, a polaridade, a ionização da molécula, a pressão de vapor (PV), os valores do coeficiente de sorção na fração mineral do solo (K_d), constante de sorção normalizada para o teor de carbono orgânico (K_{oc}) e o coeficiente de distribuição do herbicida no solo (Mendes *et al.*, 2016). Portanto, a sorção do herbicida pelos coloides dependerá da associação das características do solo com as do herbicida (Freitas *et al.*, 2014).

O grau de sorção no solo aumenta de acordo com o aumento do teor de matéria orgânica e da argila e redução do pH (Silva *et al.*, 2022). A argila e a matéria orgânica desempenham um papel importante na capacidade sorção do solo em função da sua alta superfície específica e cargas elétricas. Solos com altos teores de matéria orgânica e/ou argila têm elevada capacidade

de adsorção (Guimarães *et al.*, 2018). A influência desses fatores na sorção de herbicidas pode ter implicações em sua eficácia e na contaminação do meio ambiente.

Diversos métodos são empregados para determinar a capacidade de sorção dos solos, como espectrometria de massa, radioisótopos e cromatografia líquida e gasosa. No entanto, alternativamente existe a possibilidade de estimar a sorção pelos bioensaios, utilizando-se espécies vegetais de fácil cultivo, alta taxa de crescimento e que apresentam alta sensibilidade ao herbicida de interesse (bioindicadores) (Silva *et al.*, 2014; Duque *et al.*, 2020). As vantagens dos bioensaios são a sua simplicidade, versatilidade, alta sensibilidade e são menos custosos e permitem a detecção de baixos níveis de metabólitos tóxicos que podem não ocorrer com métodos químicos e habilidade de quantificar apenas a fração biologicamente ativa do herbicida (Duque *et al.*, 2020).

3.2.2. Lixiviação

A lixiviação é a principal forma de transporte das moléculas não-voláteis e solúveis na solução do solo. A lixiviação se refere ao processo pelo qual os herbicidas aplicados se movem no perfil do solo, principalmente por meio da força gravitacional e, potencialmente, atingem águas subterrâneas ou corpos d'água superficiais (Refatti *et al.*, 2017; Monquero e Silva, 2021). A lixiviação é fundamental para incorporação superficial de maior parte dos herbicidas. Quando herbicidas são lixiviados no solo, podem atingir o banco de sementes das plantas daninhas e garantir um controle eficiente. Porém, quando em excesso, pode levar o herbicida para camadas do solo mais profundas, limitando sua ação, gerando efeitos adversos em organismos não visados e promovendo contaminação do lençol freático (Silva *et al.*, 2019; Bandeira *et al.*, 2022).

O movimento do herbicida no solo pode ocorrer devido a vários fatores, incluindo características do solo, condições climáticas, propriedades do herbicida e técnicas de aplicação do herbicida (Silva *et al.*, 2022). A compreensão desses fatores é de suma importância para prever o comportamento de herbicidas em diferentes solos e para escolher as dosagens adequadas, evitando efeitos prejudiciais ao ambiente e às culturas plantadas em sucessão (Oliveira e Brigenhti, 2011).

As propriedades do solo como: textura, densidade, tamanho e distribuição dos poros, pH, teor de água, topografia e declividade da área podem influenciar a lixiviação do herbicida (Monquero e Silva, 2021). Em solos com menor valor de pH e teor de matéria orgânica, como

a maioria dos Latossolos e Neossolos, o herbicida tem maior potencial de ser lixiviado através do perfil do solo (Pereira *et al.*, 2017).

A lixiviação é influenciada também pelas características do herbicida entre os quais: a solubilidade da molécula em água, a sua adsorção ao solo e a meia-vida. Essas características determinam a biodisponibilidade e a persistência de um herbicida no solo e precisam ser analisadas em conjunto (Refatti *et al.*, 2017). Os herbicidas fortemente adsorvidos, mesmo extremamente solúveis em água, não estão predispostos a perdas por lixiviação (Correia, 2018). Os herbicidas que apresentam alta solubilidade em água e baixa adsorção às partículas do solo são mais propensos à lixiviação, o que representa um risco para o meio ambiente.

Os herbicidas podem ser classificados conforme o seu potencial de lixiviação usando o índice GUS (Groundwater Ubiquity Score), proposto por Gustafson (1989). Segundo esse índice existem três categorias de herbicidas: não lixiviáveis ($GUS < 1,8$); lixiviáveis ($GUS > 2,8$) e lixiviação intermediária ($1,8 > GUS < 2,8$) (Silva *et al.*, 2014).

A lixiviação de herbicidas pode ser determinada por amostragem direta da água, análise de amostras de solo, utilização de lisímetros e utilização de colunas de solos deformados. A técnica da coluna de solos é a mais utilizada para quantificar o potencial de lixiviação. Nos experimentos são empregadas condições controladas de umidade e precipitação, o que permite a comparação de diferentes classes de solo em um único ensaio (Freitas *et al.*, 2014, Passos *et al.*, 2015). O uso das colunas de solo para estudos de lixiviação de pesticidas possibilita uma aproximação das condições de campo e apresenta uma boa reprodutibilidade.

3.3. Fatores que influenciam o comportamento do herbicida no solo

A dinâmica do comportamento dos herbicidas no solo está relacionada aos atributos do solo tais como: textura, estrutura, teor de matéria orgânica, pH, capacidade de troca catiônica (CTC), conteúdo de água, relevo, comunidade microbiana, equilíbrio nutricional, as condições ambientais (umidade relativa do ar, temperatura, luminosidade, vento e chuvas), as propriedades físico-químicas das moléculas de herbicidas, a interação destes fatores, as formas de manejo da cultura, a tecnologia de aplicação dos herbicidas e a presença ou ausência de plantas (Christoffoleti *et al.*, 2008, Monquero e Silva, 2021).

3.3.1. Propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo

3.3.1.1. Matéria orgânica do solo

A matéria orgânica é o componente orgânico do solo, composto por resíduos vegetais e animais em vários estágios de decomposição e é dividida em substâncias humificadas e não humificadas (Santos *et al.*, 2018). Possui grande importância nas características físicas e químicas do solo. Atua como fonte de nutrientes, aumenta a capacidade tampão e a CTC do solo, além disso, afeta a agregação das partículas (Hoffmann *et al.*, 2018). A matéria orgânica desempenha também um papel importante no comportamento dos herbicidas no solo pois afeta a sorção, degradação e mobilidade de herbicidas no solo (Silva *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2023).

A presença de matéria orgânica no solo pode aumentar a sorção de herbicidas por fornecer uma grande área de superfície para adsorção (Guimarães *et al.*, 2018). A matéria orgânica possui alta capacidade de adsorção devido aos seus grupos funcionais carregados negativamente, que podem se ligar a herbicidas carregados positivamente por meio de interações eletrostáticas (Okada *et al.*, 2016). A ligação de herbicidas à matéria orgânica reduz sua disponibilidade para absorção pelas plantas e sua mobilidade no solo, o que diminui o risco de lixiviação ou escorrimento (Sousa *et al.*, 2018). Portanto o incremento de qualquer material orgânico em um solo em que foi aplicado um determinado herbicida, pode influenciar o comportamento da molécula, aumentando a sorção do herbicida, o tornando menos disponível para absorção das plantas, ou ativando a microbiota do solo, e assim, promover um aumento de sua degradação (Correia, 2018; Duhan *et al.*, 2020).

A matéria orgânica também pode influenciar a degradação de herbicidas no solo por fornecer uma fonte de alimento para microrganismos, que desempenham um papel crítico na degradação de herbicidas. Os microrganismos decompõem os herbicidas por meio de um processo chamado biodegradação, que envolve o uso do herbicida como fonte de carbono. A taxa de biodegradação depende da disponibilidade de carbono no solo, que é amplamente determinada pelo conteúdo de matéria orgânica (Hoffmann *et al.*, 2018; Monquero e Silva, 2021).

A matéria orgânica pode representar até 90% da superfície reativa para retenção de cátions em solos argilosos altamente intemperizados (Christoffoleti *et al.*, 2008). em decorrência disso, este é o primeiro fator a ser considerado em estudo de sorção e dessorção (Oliveira e Brighenti, 2011). Nos estudos da influência das propriedades do solo na eficácia do herbicida indaziflam, no controle de *Kochia scoparia* L., Sebastian *et al.* (2017) constataram que é necessária uma concentração de herbicida de 10 a 100 vezes maior para produzir a

redução de crescimento de 50% para um solo com 16,8% de matéria orgânica em comparação com um solo com 0,4%.

3.3.1.2. Minerais de argila

Os minerais da argila desempenham um papel crucial no comportamento dos herbicidas no solo. Por possuírem alta área superficial e carga negativa, interagem com herbicidas por meio de forças eletrostáticas e interações de van der Waals (Christoffoleti *et al.*, 2008; LI *et al.*, 2017). Os herbicidas podem se ligar a argila por meio de vários mecanismos, incluindo troca catiônica, ligações de hidrogênio e interações hidrofóbicas. A ligação do herbicida à argila reduz sua mobilidade no solo, tornando-o menos propenso à lixiviação para águas subterrâneas ou escoamento para águas superficiais (Gérard, 2016; Tantarawongsa e Ketrot, 2020).

Os minerais de argila podem aumentar a sorção de herbicidas no solo, fornecendo uma grande área de superfície para adsorção. Solos com alto teor de argila tendem a ter maior capacidade de sorção quando comparado com solos arenosos (Tantarawongsa e Ketrot, 2020). Silva *et al.* (2022), estudando os fatores envolvidos nos processos de sorção, dessorção, meia-vida e lixiviação do sulfometuron-methyl em três classes de solo, relataram que a grande quantidade de areia presente no Neossolo Quartzarênico pode ter influenciado na menor sorção do herbicida e no alto potencial de lixiviação observado nesse solo.

O tipo e a composição da argila também têm sido associados à capacidade de retenção do solo. Os minerais de argila do tipo 2:1 como esmectitas e vermiculitas, possuem alta capacidade de troca catiônica e maior área superficial específica, o que pode aumentar a sorção de herbicidas catiônicos. em contraste argilominerais do tipo 1:1 como a caulinita, têm baixa capacidade de troca catiônica, menor expansividade, e área superficial são menos eficazes na sorção de herbicidas (Christoffoleti *et al.*, 2008; Silva et al, 2022).

Além de influenciar a adsorção de herbicidas, os minerais de argila também podem afetar a degradação de herbicidas no solo. A sorção de herbicidas pelos argilominerais pode protegê-los da degradação por microrganismos ou reações químicas, reduzindo sua degradação (Araújo *et al.*, 2012).

3.3.1.3. pH do solo

O pH se refere à concentração de íons H^+ na solução do solo expressa em base logarítmica, é uma das principais propriedades do solo que afeta o comportamento de herbicidas ionizáveis (Faria *et al.*, 2018). O pH afeta a carga das partículas do solo, que por sua vez afeta a carga nas moléculas do herbicida. Os herbicidas são geralmente mais solúveis e móveis em

solos ácidos, onde as partículas têm uma carga líquida positiva. em contraste, em solos alcalinos, onde as partículas têm uma carga líquida negativa, é mais provável que os herbicidas sejam absorvidos e retidos pelo solo (Oliveira e Brighenti, 2011).

Além disso, o efeito do pH no comportamento do herbicida está estreitamente relacionada a capacidade de dissociação eletrolítica (pKa) dos compostos. em condições em que o pH é inferior ao valor de pKa, herbicidas ácidos fracos tendem a permanecer no seu estado, diminuindo a repulsão entre o herbicida e as cargas negativas no solo e, conseqüentemente, favorecendo a sua sorção. Quando o pH aumenta em relação ao pKa, as moléculas dos herbicidas ácidos fracos estão carregadas negativamente e o que aumenta a sua mobilidade e são menos retidas pelo solo (Oliveira e Brighenti, 2011; Marinho *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2022). Para herbicidas bases fracas, quando o pH da solução é menor que o pKa do herbicida, a concentração da forma protonada é maior podendo ser sorvidas facilmente aos coloides. em contrapartida, quando o pH da solução é maior que o pKa do herbicida básico, há predominância da forma molecular, podendo reduzir a sua capacidade de adsorção (Oliveira e Brighenti, 2011; Silva *et al.*, 2014). Segundo Santos *et al.* (2018), com o aumento do pH da solução do solo, a sorção do hexazinone, herbicida base fraca, foi reduzida. e conseqüentemente elevou o potencial de lixiviação.

Mudanças no pH podem afetar a carga na superfície do solo o que afetara a atração ou repulsão entre o herbicida e o solo. Alguns herbicidas são mais sensíveis às mudanças de pH do que outros. Por exemplo, a sorção de herbicidas pouco ácidos diminui à medida que o pH do solo aumenta, enquanto a sorção de herbicidas fortemente ácidos, não é afetada por mudanças no pH (Sousa *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2022). Portanto, o pH do solo quando associado com o caráter ácido ou básico do herbicida, influencia sua dissociação, conseqüentemente a sua biodisponibilidade em solução do solo (Faria *et al.*, 2018).

3.3.2. Propriedades físico-químicas do herbicida

As propriedades físico-químicas dos herbicidas desempenham um papel crucial em seu comportamento no solo. As propriedades mais importantes incluem solubilidade, pressão de vapor (Pv), constante de equilíbrio de ionização ácido (pKa) ou base (pKb), persistência (Oliveira e Brighenti, 2011).

Solubilidade é a capacidade de uma substância se dissolver em água. A solubilidade dos herbicidas afeta sua mobilidade no solo e seu potencial de lixiviação para águas subterrâneas ou escoamento para águas superficiais (Tangtong, 2014). Herbicidas com alta solubilidade são

mais móveis no solo e são mais propensos a lixiviar ou escorrimento do que herbicidas com baixa solubilidade (EL-Nahhal e Hamdona, 2017).

A volatilidade ou pressão de vapor é a tendência de uma substância para vaporizar. Os herbicidas que são voláteis podem evaporar da superfície do solo e se deslocar para fora do local alvo, podendo causar danos não intencionais a plantas ou animais não visados. A volatilidade dos herbicidas é influenciada por fatores como temperatura, umidade e velocidade do vento (Lavorenti, 1999).

A constante de equilíbrio de ionização ácida (pKa) indica a maior ou a menor tendência de um herbicida em se ionizar. Os valores de pKa indicam se o herbicida é iônico e dentro de qual faixa do pH do solo isto acontece. Os herbicidas podem ser ácidos, básicos ou não iônicos (Oliveira e Brighenti, 2011; Silva *et al.*, 2014). Os herbicidas não-iônicos não doam nem recebem prótons na solução do solo, independentemente do pH da solução, mantendo sua estrutura molecular (Petter *et al.*, 2016). Quanto aos herbicidas iônicos, podem apresentar diversas formas de dissociação de acordo com o valor do pH do solo e o seu caráter (ácido ou básico).

A persistência é o período em que um herbicida permanece no ambiente sem, necessariamente apresentar atividade no solo. É importante para determinar o período de controle das plantas daninhas, bem como para identificar o risco potencial desse resíduo no solo. Quando herbicidas que possuem longa persistência no ambiente são aplicados em solos que têm baixa capacidade de sorver esses compostos, o risco de contaminação do ambiente pode ser muito elevado (Monquero e Silva, 2021). A persistência pode ser estimada pela meia-vida do produto ($t_{1/2}$), que representa o tempo necessário para que ocorra dissipação de 50% da quantidade do herbicida inicialmente aplicada (Silva *et al.*, 2014).

A longa persistência de herbicidas no solo pode ser desejável quando se tem como objetivo a eficácia de controle das plantas daninhas por um período maior. Porém, essa característica se torna indesejável quando representa um prejuízo para as culturas plantadas em sucessão ou aumenta os riscos de contaminação ambiental. Os herbicidas que são persistentes ou de degradação lenta podem se acumular no solo e potencialmente causar danos ambientais a longo prazo (Azevedo *et al.*, 2018).

3.4. Características do herbicida diuron

O diuron (3-(3,4-dichlorophenyl)-1,1-dimethylurea) é um herbicida inibidor do Fotossistema II (FS II) e pertence ao grupo das ureias substituídas. Os herbicidas deste grupo

são conhecidos também como inibidores da síntese de Hill (PPDB, 2023; Rodrigues e Almeida, 2018). A inibição da fotossíntese que acontece pela ligação do herbicida ao sítio de ligação da plastoquinina Q_B, na proteína D1 do fotossistema II, localizado na membrana do tilacóide do cloroplasto. em consequência, ocorre o bloqueio do transporte de elétrons da plastoquinina Q_A para plastoquinina Q_B, o que interrompe a fixação de CO₂ e a produção de ATP e NADPH₂, elementos essenciais para o crescimento das plantas. entretanto, a morte da planta ocorre devido ao processo de peroxidação de lipídeos, que causa clorose foliar que se desenvolve após o tratamento (Oliveira *et al.*, 2020).

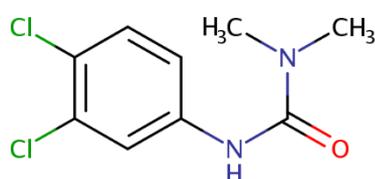


Figura 1. Fórmula estrutural do herbicida diuron

O diuron é um herbicida de amplo espectro recomendado para o controle de mono e dicotiledôneas e aplicado em pré e pós-emergência (até 3 pares de folhas) das plantas daninhas em várias culturas como algodão, café, cana-de-açúcar, trigo e citros (Rubio-Bellido *et al.*, 2016). esse produto apresenta baixa solubilidade em água (42 mg L⁻¹), pressão de vapor de 9,2 x 10⁻⁶ Pa ((25 °C) e coeficiente de partição octanol-água (Kow) de 589. A meia-vida do diuron em condição de campo é de 90 dias, porém em altas doses os resíduos podem persistir por mais de um ano dependendo dos atributos do solo (Shaner, 2014; Santos *et al.*, 2015; Rodrigues e Almeida, 2018).

O diuron é classificado como não volátil e não-iônico. Por ser não ionizável, não troca prótons com a solução do solo, permanecendo em sua forma molecular. Contudo, pode apresentar polaridade e o seu comportamento no solo ser afetado pelo pH, pelo material orgânico e tipos de minerais de argila (Petter *et al.*, 2016).

A absorção das moléculas de diuron ocorre pelas raízes. A sua translocação ocorre via xilema com tendência a se mover junto ao fluxo de água. Os sintomas de sua fitotoxicidade são caracterizados pela clorose (tonalidade verde-claro) internerval e das bordas das folhas, seguida de necrose generalizada (Jin *et al.*, 2017). Sua degradação ocorre principalmente pela ação dos microrganismos do solo (Villaverde *et al.*, 2017), mas também por fotodegradação quando o produto é exposto à luz solar por vários dias.

O diuron apresenta alto índice de adsorção, principalmente para solos com alto teor de matéria orgânica. Apesar da importância da argila na sorção do diuron, a alta hidrofobicidade desse herbicida aumenta a afinidade por locais de adsorção lipofílica na matéria orgânica, devido à presença de um anel aromático sem barreira estérica na molécula, que permite o estabelecimento de interações de Van der Waals com a matéria orgânica (Wang *et al.*, 2015).

O diuron é considerado um herbicida pouco lixiviável, razão pela qual, a dose adequada depende muito das características do solo (Rodrigues e Almeida, 2018; Silva *et al.*, 2019). Assim solos com baixos teores de matéria orgânica apresentam alto potencial de lixiviação do herbicida.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Sorção do herbicida diuron em solos cultivados com citros

4.1.1. Coletas das amostras

Neste estudo foram utilizados dois substratos: a areia e o solo dos pomares comerciais de citros. As amostras de solos foram coletadas em áreas sem histórico de aplicação de herbicidas na Fazenda Santa Rosa (03° 12' 05.7" S, 60° 13' 35.0" W) e Fazenda Canaã (02° 42' 40,2" S, 59° 27' 11,4" W), nos municípios de Iranduba (AM) e Rio Preto da Eva (AM) respectivamente (Figura 2). As coletas foram feitas nas profundidades de 0 a 40 cm, que é a considerada a profundidade média das raízes das plantas cítricas.

A areia foi coletada as proximidades do igarapé Pereva na Rodovia AM 010, km 168 (02° 54' 24,6" S, 59° 08' 28,0" W) no município de Itacoatiara -AM.

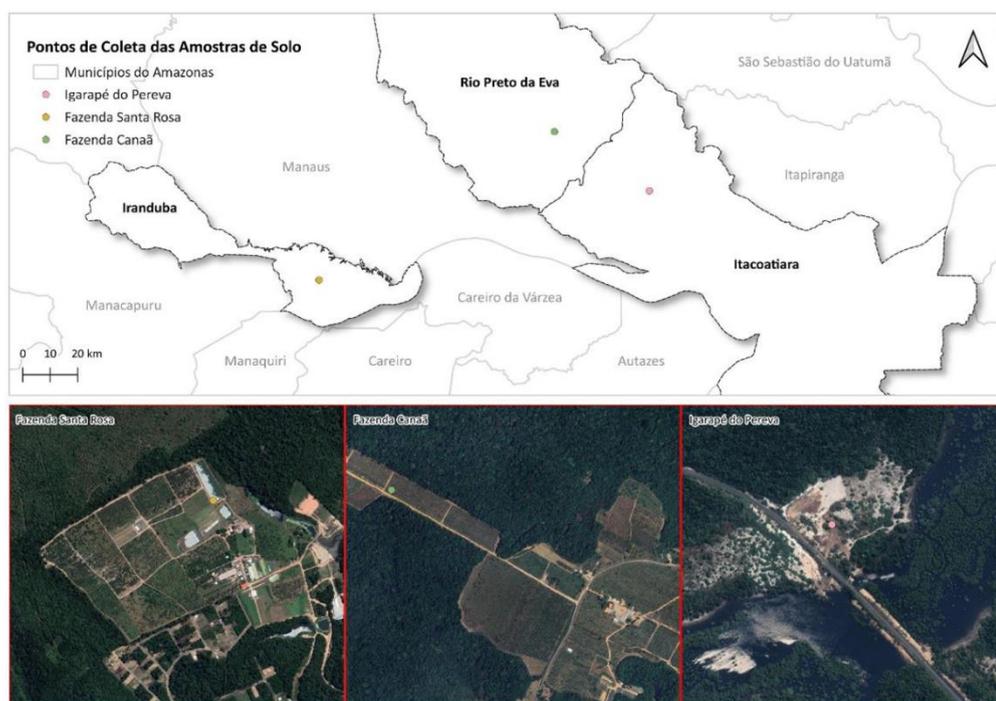


Figura 2. Mapa das áreas de coleta dos substratos.

Após a coleta, as amostras dos solos foram levadas para a casa de vegetação em sacos plásticos devidamente identificados. em seguida foram secas e peneiradas em de malha 2 mm, e as amostras de solos submetidas a análises física e química realizadas pelo Departamento de

Solos da ESALQ -Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo, cuja composição encontra-se na tabela 1.

Tabela 1. Características físico-químicas das amostras de solos de dois pomares de citros no Amazonas.

	pH		P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	m
Localidades	H ₂ O	CaCl ₂	mg.dm ⁻³			cmol _c .dm ⁻³			%			
Irاندuba	5,2	4,5	49,0	28,0	0,8	0,4	0,3	4,4	1,3	5,7	23,0	19,0
Rio Preto da Eva	5,4	4,8	12,3	20,0	1,2	0,7	0,1	5,0	2,0	7,0	29,0	5,0
	B	Cu	Mn	Zn	Fe	MO	Areia	Argila	Silte	Cl.tex		
Localidades	mg.dm ⁻³					g. kg ⁻¹		%				
Irاندuba	0,4	1,0	1,8	4,2	69,5	19,9	60	38,0	3,0	Arg.		
Rio Preto da Eva	0,5	1,0	1,9	3,3	58,8	25,8	29,0	61,0	11,0	mt.arg		

Mt.arg = textura muito argilosa; arg. = textura argilosa. Fonte: Departamento de Ciência do Solo, ESALQ, SP,2023. Cl. Tex : classe textural.

A areia foi lavada em água filtrada até retirar o excesso de impurezas e foi incubada em baldes de polietileno com ácido sulfúrico (H₂SO₄) diluído em água em uma concentração 1,0 M L⁻¹, para eliminação da matéria orgânica, mantendo lâmina de solução 10 cm acima do substrato. Após 24 horas, lavou-se a areia mais uma vez com água destilada em abundância para retirada o excesso de ácido até que se atingisse um pH próximo de 7,0. Posteriormente, a areia foi acondicionada em sacos plásticos de 2 kg para ser esterilizada em autoclave por sessenta minutos a 120° C.

A capacidade de campo da areia lavada e dos solos foi calculada para evitar o excesso ou falta de água durante o crescimento da planta bioindicadora. O pepino (*Cucumis sativus* L.) foi a planta indicadora para avaliar a sorção do herbicida nos substratos (Figura 3).

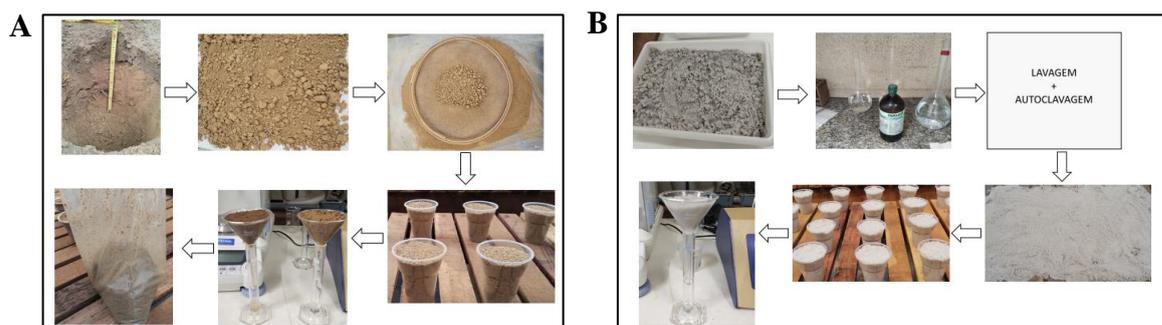


Figura 3. Esquema visual da montagem do experimento de sorção: solo (A), areia (B).

4.1.2. Aplicação e avaliação dos efeitos dos herbicidas em substratos

O experimento foi instalado em delineamento inteiramente casualizado. Os tratamentos com os solos foram em arranjo fatorial de 2 x 5, com quatro repetições. Os fatores foram: fator A: duas localidades (Irاندuba e Rio Preto da Eva) e fator B: cinco doses do herbicida diuron (0, 500, 1.000, 2.000 e 4.000 g. ha⁻¹ do i.a.). No experimento com areia lavada foram nove tratamentos e quatro repetições. As doses de diuron no ensaio foram: 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 e 24 g ha⁻¹ de i.a.

O herbicida utilizado foi o diuron 500 SC[®]. A aplicação da solução do herbicida foi com pipeta graduada, sempre da menor para a maior dose. Após a aplicação dos herbicidas, os substratos foram homogeneizados em sacos de polietileno e depois colocados em copos plásticos de 500 mL. A semeadura do pepino foi feita após a aplicação do herbicida, sendo semeadas quatro sementes em cada copo. Após a emergência das plântulas, fez-se o desbaste, deixando-se três plântulas em cada copo. Cada copo consistiu-se em uma unidade experimental.

As necessidades nutricionais das plantas foram supridas por meio de solução nutritiva modificada de Hoagland & Arnon (1950) que foi fornecida na irrigação, em todos os tratamentos em dias alternados. O teor de água nos copos foi mantido próximo à capacidade de campo, com reposição diária.

Quatorze dias após semeadura (DAS), as plantas foram cortadas rente à superfície do solo, lavadas e levadas ao laboratório para secagem em estufa de ventilação forçada a 60°C até o peso constante e posterior pesagem em balança de precisão.

Para efeito de análise, os valores do peso da matéria seca obtidos na dose 0 g ha⁻¹ do diuron foram considerados como 100% de crescimento da planta bioindicadora e o efeito das demais doses foram em função da dose controle sobre a característica avaliada.

As doses de diuron que resultaram em 50% de inibição do peso da matéria seca das plantas de pepino (I₅₀) foram determinadas com interpolação gráfica de doses de diuron x peso da matéria seca de plântulas de pepino, expressos em percentagem, em relação à testemunha.

Com os resultados de I₅₀ para os solos e areia lavada, foi calculada a razão de sorção (RS) pela relação entre a I₅₀ encontrada no solo e a I₅₀ encontrada na areia (Freitas et al, 2014).
equação da razão de sorção entre solo e areia

$$RS = (I_{50} \text{ solo} - I_{50} \text{ areia}) / I_{50} \text{ areia}$$

4.2. Lixiviação do diuron

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Faculdade de Ciências Agrárias no setor sul do *Campus* da Universidade Federal do Amazonas (FCA-UFAM).

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial de 2x4x5, sendo fator A: duas localidades (Iranduba e Rio Preto da Eva), fator B: quatro profundidades (0- 10, 10-20, 20- 30, 30- 40 cm) e o fator C: cinco doses do herbicida diuron (0, 500, 1000, 2000 e 4000 g/ha do i.a.), com quatro repetições.

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de solos montadas em tubos de policloreto de vinila (PVC) de 10 cm de diâmetro e 42 cm de comprimento. Telas de voal foram colocadas na parte basal das colunas de PVC, para reter o solo e permitir a drenagem (Figura 4).



Figura 4. Coluna de PVC- Unidade experimental.

As colunas foram preenchidas com as amostras de cada solo, conforme as camadas (0- 10, 10-20, 20- 30, 30- 40 cm) coletadas no perfil do solo em campo. Depois, as colunas foram acondicionadas em recipientes contendo água, objetivando a saturar o solo por capilaridade e assim, acentuar a deposição do solo e eliminar o ar nos macros e microporos. em seguida, as colunas foram transferidas para bancadas na casa de vegetação, onde permaneceram inclinadas, em repouso por 48 horas para o solo restaurar sua capacidade de campo.

Após esse tempo, o herbicida diuron 500 SC[®] foi aplicado no topo das colunas com pipetador de 10 mL, conforme as dosagens de cada tratamento, com volume de calda igual para

todas as aplicações. Passadas 24 horas após a aplicação do herbicida, as colunas preenchidas com o solo receberam o equivalente a 150 mm de chuva e permaneceram por mais 72 horas em posição vertical. Após esse período, as colunas foram colocadas na posição horizontal e abertas longitudinalmente, para se fazer o plantio de pepino (*Cucumis sativus* L. var. Aodai), usado como espécie bioindicadora. Quatro sementes de pepino foram semeadas a cada faixa de 10 cm de solo nas colunas, a 1 (um) cm de profundidade. Após a emergência das plântulas, foi feito o desbaste, deixando três plântulas a cada 10 cm. No 14º dia após a semeadura (DAS), as plântulas foram cortadas rente ao solo e depois levadas para estufa de ventilação forçada de ar a 60°C por 72 horas para que pudesse ser avaliado o peso da matéria seca das amostras.

Avaliação da fitotoxicidade foi aos 7 e 14 dias após a semeadura de forma visual com base no método proposto pela European Weed Research Council (EWRC, 1964), que possui escala de notas de 1 a 9 (Tabela 2).

Tabela 2. Escala de avaliação visual de fitotoxicidade de herbicidas sobre das plantas.

Índice	Descrição dos sintomas visuais observados
1	Ausência de sintomas
2	Sintomas muito leves
3	Sintomas leves
4	Sintomas moderados
5	Duvidoso
6	Prejuízo leve na colheita
7	Prejuízo forte na colheita
8	Prejuízo muito forte na colheita
9	Prejuízo total na colheita

4.3. Análise estatística

Os dados do peso da matéria seca da planta-teste no ensaio de lixiviação e sorção foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com o auxílio do *software Assistat*. Os dados de lixiviação foram transformados em $x+1$ e as médias comparadas por meio do teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Quando significativos, os resultados foram analisados com o emprego de regressão. Para a seleção da equação de regressão, considerou-se a equação de melhor ajuste aos dados originais combinados à explicação biológica da característica.

No experimento de lixiviação, após analisar separadamente cada local, se fez uma análise conjunta, após teste de homogeneidade dos Quadrados Médios de Resíduos. Quando a relação entre o maior e o menor QM Resíduos não foi superior a quatro vezes o outro local do experimento (Ferreira, 2000). Com isso todos os locais foram incluídos na análise conjunta sem restrições.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Sorção do herbicida diuron

Para os fatores Local e Dose, isoladamente, houve significância no peso da matéria seca (Tabela 3), isso mostra a importância de cada um desses fatores na sorção do diuron em pomares cítricos. A interação entre eles não influenciou significativamente no peso da matéria seca.

Tabela 3. Resumo da análise de variância (ANOVA) para o peso da matéria seca da parte aérea de plântulas de pepino sementeas em solos cultivados com citros, Manaus, 2023.

Fonte de Variação	G.L.	Valores do teste F
Local	1	6,1518 *
Dose	4	1155,1382 **
Local X Dose	4	0,9164 ns
C.V.		7,59%

**significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$); *significativo a 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ns = não significativo pelo teste F, ($p \geq 0,05$).



Figura 5. Sintomas de fitotoxicidade nas plântulas de pepino causados pelo herbicida diuron.

Os sintomas de fitotoxicidade do herbicida foram visíveis na parte aérea da planta bioindicadora e foram caracterizados pela clorose das nervuras foliares, seguido pelo branqueamento dos tecidos foliares e por necrose e morte da planta (Figura 5). Os sintomas foram mais pronunciados conforme se aumentava as doses, tanto na areia lavada quanto nos solos. Tais sintomas visuais são ligados ao mecanismo de ação do herbicida.

O diuron é inibidor o fotossistema II, que bloqueia o sistema de transporte de elétrons interrompendo a fixação de CO_2 e a produção de ATP e NADPH. em consequência disso, ocorre o aparecimento de cloroses internervais e das bordas das folhas devido à foto-oxidação da clorofila. Também podem ocorrer rompimentos na membrana citoplasmática em decorrência da peroxidação de lipídios, causada pelos radicais tóxicos (Oliveira *et al.*, 2021).

O peso da matéria seca das plântulas de pepino foi maior no solo coletado em Rio Preto da Eva em comparação ao de Iranduba (Tabela 4). esse fato pode estar relacionado aos teores de matéria orgânica e de argila dos solos.

Tabela 4. Médias do peso da matéria seca das plântulas de pepino em solos cultivados com citros. Manaus, 2023.

Local	Peso da matéria seca da planta-teste (g)
Rio Preto da Eva	0,261 a
Iranduba	0,246 b
C.V.	7,59 %

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quanto maior a sorção de um herbicida no solo, menor é a quantidade disponível desse composto na solução do solo e conseqüentemente menor será a absorção do herbicida pela planta, permitindo que haja maior acúmulo de matéria seca pelas plântulas de pepino.

A amostra de solo de Rio Preto da Eva se caracteriza por apresentar maior teores de matéria orgânica (25,8 g kg⁻¹) e argila (61%) em relação ao solo de Iranduba (19,9 g kg⁻¹ de matéria orgânica e 38% de argila) (Tabela 1). Os teores de matéria orgânica e argila nesse solo podem ter sido responsáveis por proporcionar uma maior inativação do diuron. esses resultados são semelhantes aos encontrados por Chagas *et al.* (2019) e Tantarawongsa e Ketrot (2020), que estudando a adsorção do diuron constataram que entre os solos avaliados, os que apresentavam maior teor de argila e matéria orgânica tiveram os maiores valores de coeficientes de sorção. esses autores concluíram então que a matéria orgânica e a argila têm um papel importante na sorção do herbicida diuron pelo solo.

Por ser partícula de tamanho pequeno, a argila promove uma superfície eletrostática de troca mais rápida em relação a areia e silte, o que favorece a maior adsorção de herbicidas (Marinho *et al.*, 2018). O caráter apolar e hidrofóbico do herbicida diuron favorece sua sorção pela matéria orgânica, por mecanismo de partição hidrofóbico e ligações hidrogénio, isso porque a matéria orgânica tem maior afinidade por compostos hidrofóbicos (Tantarawongsa e Ketrot, 2020). A relação positiva entre teores de matéria orgânico, de argila e sorção do diuron é relatada por vários autores (Sousa *et al.*, 2018; Chagas *et al.*, 2019; Tantarawongsa e Ketrot, 2020; Magalhães *et al.*, 2022).

Segundo Rojas *et al.* (2022), além do teor, o conteúdo e a composição da matéria orgânica afetam a sorção de herbicidas no solo. A matéria orgânica contém vários grupos funcionais, como carboxila, hidroxila aminas, e estruturas alifáticas e grupos aromáticos, que podem interagir com moléculas de herbicidas por meio de forças de Van Der Waals, pontes de hidrogênio e interações π - π (Li *et al.*, 2017).

Outro atributo do solo que pode ter influenciado a diferença de sorção do diuron nos solos avaliados é a capacidade de troca catiônica (CTC). O solo de Rio Preto da Eva apresentou uma maior CTC ($7,0 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$) em comparação ao solo coletado em Iranduba ($5,7 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-1}$). Solos com maior CTC geralmente têm maior potencial de absorção de herbicidas, maior capacidade de adsorção e possíveis interações com o pH e o teor de matéria orgânica do solo (Silva *et al.*, 2022). Isso explicaria a maior sorção no solo de Rio Preto da Eva em relação ao solo de Iranduba. Quando Matos *et al.* (2020) avaliaram a dinâmica do diuron no solo, relataram que maiores teores de matéria orgânica e CTC nos solos com textura média e argilosa contribuem para maior sorção do herbicida nesses solos em relação ao solo de textura arenosa.

Os mesmos resultados foram obtidos por Sousa *et al.* (2018) no estudo do comportamento (sorção, dessorção e meia-vida) do diuron em solos com diferentes atributos. Os autores observaram que os coeficientes de sorção foram maiores em solo com maior CTC e concluíram que a CTC do solo é um dos fatores que influenciam a sorção de herbicidas não ionizáveis como o diuron, pois está associada aos minerais de argila, que são formados por camadas de óxidos de silício e alumínio, capazes de se ligarem aos cátions do solo e a outras moléculas polarizadas com cargas parciais positivas.

As porcentagens do peso da matéria seca acumulado pelas plântulas de pepino em função das doses de diuron aplicadas, em relação à testemunha (dose 0 g ha^{-1} de i.a.), estão apresentadas nas figuras 6 e 8, respectivamente para areia e solos dos pomares cítricos.

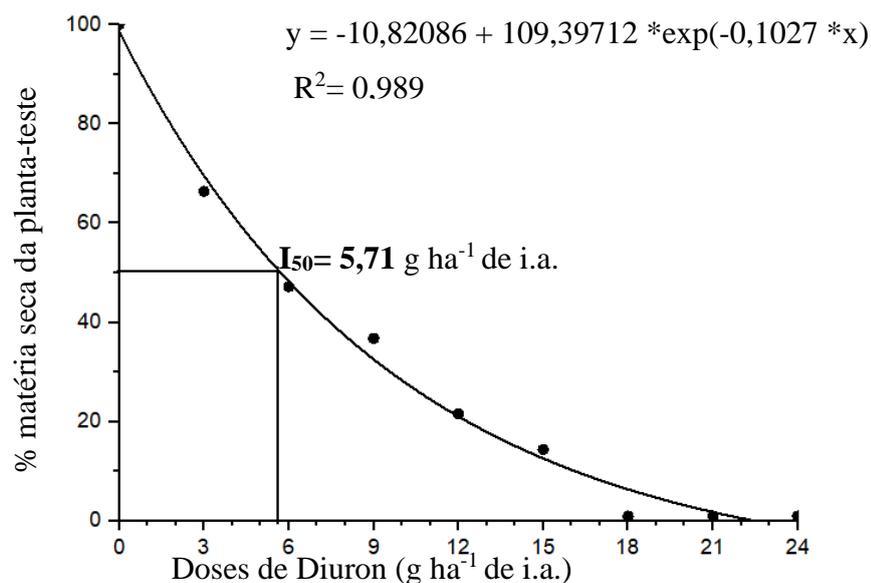


Figura 6. Porcentagens do peso da matéria seca acumulada pelas plântulas de pepino em função das doses de diuron em areia lavada.

Na areia lavada a dose de diuron que provocou 50% de inibição (I_{50}) no peso matéria seca das plântulas de pepino foi de 5,8 g ha⁻¹ de i.a. (Figura 6). A menor dose aplicada (3 g ha⁻¹ de i.a.) provocou mudanças significativas no peso das plântulas, reduzindo 33,6 % do peso da matéria seca em comparação com a testemunha, enquanto a dose mais elevada (24 g ha⁻¹ de i.a.) ocasionou a morte total das plântulas avaliadas. O que se explica pelo fato da areia lavada ser um material livre de matéria orgânica, com pH neutro e sem capacidade de troca catiônica ou aniônica. Deste modo, quando se aplica o herbicida na areia, esse fica totalmente livre para ser absorvido pelas plântulas de pepino, o que deixa visível os efeitos da fitotoxicidade mesmo em doses menores (figura 7).

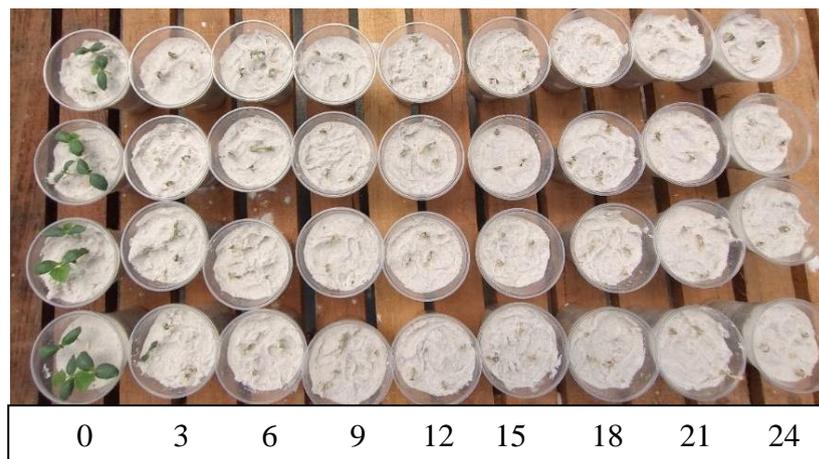


Figura 7. Fitotoxicidade de diferentes doses de diuron (g ha^{-1} de i.a.) em pepino no substrato de areia lavada.

O resultado evidencia a importância das características físico-químicas de um solo no comportamento do herbicida no mesmo. Duhan *et al.* (2020), estudando o potencial de sorção de uma variedade de herbicidas usando resíduos contendo matéria orgânica (47,6 a 65,1%) constataram que o incremento de 5% desses resíduos no solo é capaz de aumentar de 2 a 10 vezes a sorção dos herbicidas no solo. Diversos outros estudos indicam que solos com baixo teor de matéria orgânica, textura arenosa e baixa CTC possuem menos capacidade de sorção do diuron e conseqüentemente, são mais suscetíveis ao processo de lixiviação (Sousa *et al.*, 2018; Chagas *et al.*, 2019; Tantarawongsa e Ketrot, 2020; Magalhães *et al.*, 2022).

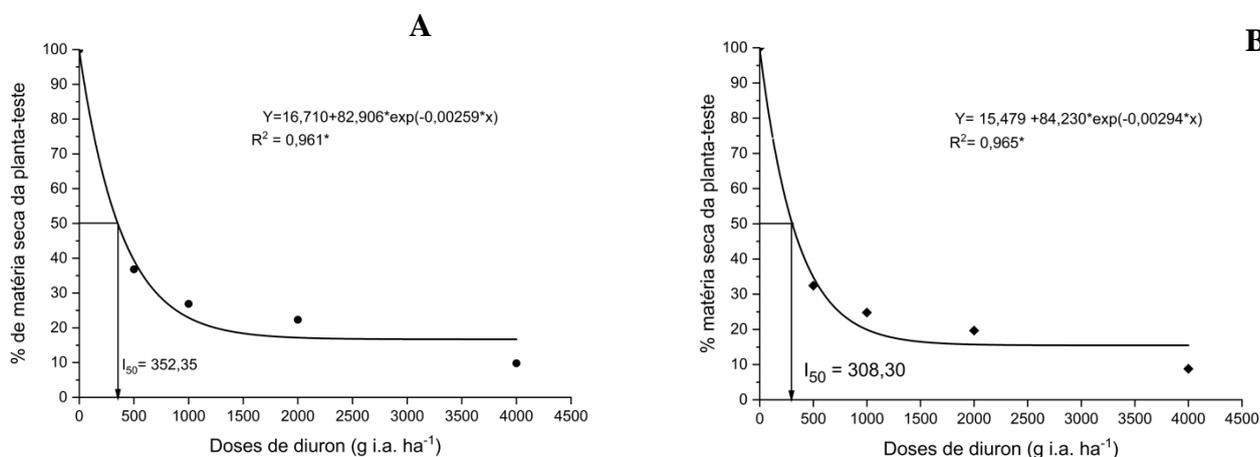


Figura 8. Porcentagens do peso da matéria seca acumulada pelas plântulas de pepino em função das doses de diuron no solo de Rio Preto da Eva (A) e Irlanduba (B).

As doses de diuron que resultaram em 50% de inibição do peso da matéria seca das plantas de pepino (I_{50}) nos solos de Rio Preto da Eva e Iranduba foram 352,35 e 308,30 $g\ h^{-1}$ de i.a., respectivamente (Figura 8). A menor dose aplicada (500 $g\ h^{-1}$ de i.a.) reduziu 63,2% e 67,6% o peso da matéria seca das plântulas de pepino em relação à testemunha em Rio Preto da Eva e Iranduba, respectivamente. A dose de 2000 $g\ h^{-1}$ de i.a. que é dose mínima recomendada pelo fabricante para a aplicação em pré-emergência em solo médio e pesado, provocou uma redução de 77,7% (Rio Preto da Eva) e 80,7% (Iranduba) na matéria seca das plântulas de pepino, enquanto a dose de 4000 $g\ h^{-1}$ de i.a. provocou uma redução de mais 90 % nos dois solos (Figura 8).

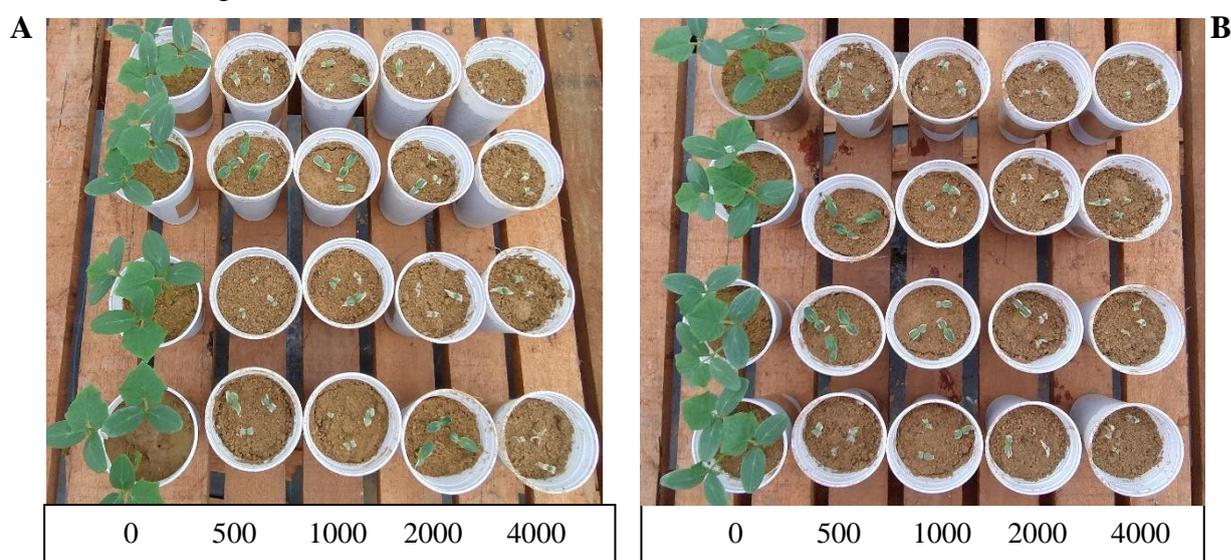


Figura 9. Fitotoxicidade de diferentes doses ($g\ h^{-1}$ de i.a.) de diuron em pepino nos solos de Rio Preto da Eva (A) e Iranduba (B).

A aplicação de doses crescentes de diuron nos solos diminuiu o tamanho e o acúmulo de matéria seca da planta bioindicadora conforme é possível observar nas figuras 8 e 9. O crescimento e o acúmulo de matéria seca das plântulas de pepino foram inversamente proporcionais a dose aplicada. Logo, maiores doses proporcionaram menores crescimento em relação a testemunha.

A maior concentração de diuron no solo pode ter intensificado a redução do desenvolvimento das plântulas de pepino. Quando doses maiores de herbicidas são aplicadas no solo há uma tendência que haja maior disponibilidade desse produto para a planta absorver, o que resultara na redução de produção de biomassa (Rodrigues e Almeida, 2018).

A grande redução da matéria seca da planta bioindicadora mesmo com doses menores (500 e 1000 $g\ h^{-1}$ de i.a.) que a mínima recomendada para controle das plantas daninhas em pré emergência nos citros indica uma baixa afinidade do diuron aos solos utilizados o que pode

indicar um alto potencial de lixiviação principalmente se o herbicida permanecer no solo por muito tempo. esses resultados reforçam o fato que a recomendação de dose de diuron não deve ser feita somente considerando a textura do solo, mas também os atributos do solo como teor da matéria orgânica.

Bezerra *et al.* (2023), avaliaram a influência dos atributos do solo e do coeficiente de sorção na definição das doses de diuron em diferentes solos notaram que as doses de diuron que proporcionaram um controle eficiente (I_{80}) das plantas daninhas foram inferiores às recomendadas no rótulo desse herbicida, nas condições avaliadas. Com isso os autores concluíram que a matéria orgânica influencia a sorção do diuron e a eficiência de controle da *eleusine indica*. Portanto a recomendação atual (MAPA, 2023) que se baseia unicamente na textura do solo está desatualizada e se deve considerar outros fatores para a recomendar doses seguras de diuron, visando um controle satisfatório das plantas daninhas e redução de risco de contaminação ambiental.

Em outro estudo, Nordmeyer (2015) observou também que há uma correlação entre o teor de matéria orgânica do solo e a eficácia de herbicidas aplicados no solo. O autor concluiu que as diferenças nos níveis de matéria orgânica em uma mesma área devem ser consideradas na recomendação e aplicação de herbicidas. Com isso, é possível reduzir a quantidade de herbicida aplicada e assim ter benefícios econômicos e ecológicos.

A razão de sorção (RS) depende do I_{50} e mostra o quanto um herbicida pode ser sorvido conforme o solo. Quanto maior a RS maior será a capacidade do solo de sorver este herbicida. Na areia lavada, substrato neutro, o valor de I_{50} é baixo, por consequência a RS nesse solo será baixa e indicando assim baixa sorção do herbicida (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de I_{50} , razão de sorção (RS), matéria orgânica e sorção do diuron pela matéria orgânica, em areia e solos, Manaus, 2023.

Substratos	I_{50} g ha ⁻¹ de i.a.	RS	I_{50} inativado g h ⁻¹ de i.a.	M.O. Kg ha ⁻¹	mg herbicida inativado kg ⁻¹ M. O.
Areia	5,71	-	-	-	-
Irاندوبا	308,3	52,99	302,59	39.800	7,60
Rio Preto da Eva	352,35	60,70	346,6	51.600	6,71

Os resultados da razão de sorção corroboram com os valores do acúmulo da matéria seca, indicando que o solo de Rio Preto da Eva (RS= 60,70) tem mais capacidade de sorver o diuron que o solo coletado em Iranduba (52,99). esses resultados são semelhantes aos de Bezerra (2022) quando avaliou a sorção em dois solos, o Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e o Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA), e concluiu que os valores da razão de sorção do diuron variaram de 8,91 a 77,76.

No entanto, Ferreira (2016) encontrou valor da razão de sorção maior (RS = 299), quando avaliou a capacidade de sorção de um solo do tipo argiloso utilizado como substrato para mudas de citros no Amazonas. O autor relacionou esse resultado principalmente ao pH do solo (6,7) e a disponibilidade de nutrientes existentes nele como fósforo, potássio, cálcio, magnésio, zinco, ferro, manganês, cobre, boro e enxofre. Isso demonstra a importância dos atributos químicos do solo no comportamento do herbicida.

Fatores como a correção do solo com a adição de calcário, o incremento de materiais orgânicos compostados e adubação química podem influenciar o comportamento do herbicida no perfil, contribuindo ou não para o aumento da sorção de herbicidas. Logo, por se tratar de áreas para produção comercial, os solos estudados nesse trabalho estão sendo constantemente manejado para atender as demandas nutricionais da cultura.

5.2. Potencial de lixiviação do diuron

A análise de variância aqui apresentada é o resultado da análise conjunta. A profundidade e a dose apresentaram significância quando isolados e em interação, o que demonstra a importância desses fatores na lixiviação do diuron em solos cultivados com citros (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância para peso da matéria seca de pepino semeado em solos de área cultivada citros, Manaus, 2023.

Fonte de variação	Peso da matéria seca	
	GL	Teste F
Profundidade (P)	3	23,6152**
Doses (D)	4	829,4130**
P x D	12	8,8443**
C.V.		5,53%

**significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste F.

Ao analisar a intoxicação das plântulas de pepino foi constatado que aos 7 DAS o diuron promoveu sintomas visuais de fitotoxicidade em plantas de pepino. Na utilização da menor dose (500 g h⁻¹ de i.a.) os índices de intoxicação, de acordo com escala do EWRC (1964), foram 4; 3; 2 e 2 nas profundidades de 10; 20; 30 e 40 cm respectivamente, no entanto conforme o aumento na dosagem utilizada, os níveis de intoxicação chegaram a 6; 5; 4 e 4 em profundidades de 10; 20; 30 e 40 cm utilizando a dose de 4000 g ha⁻¹ de i.a..

Aos 14 dias após a semeadura, os sintomas visuais de fitotoxicidade foram mais intensos principalmente na camada de 0-10 cm, onde o herbicida promoveu morte total das plântulas independentemente da dose aplicada. Na utilização das doses de 500 e 1000 g h⁻¹ de i.a. os níveis de intoxicação em profundidades de 30 e 40 cm foram médias (índices 5 e 6). entretanto, doses maiores como a de 2000 e 4000 g h⁻¹ de i.a. provocaram níveis de intoxicação altos mesmo nas profundidades de 30 e 40 cm (índices 8 e 7 respectivamente) (Tabela 2).

Os valores do peso da matéria foram crescentes com o aumento da profundidade (Tabela 7 e figura 10)

Tabela 7. Médias do peso seco da plântula de pepino em solos cultivados com citros, coletados em quatro profundidades, Manaus,2023.

Profundidade do solo (cm)	Peso da matéria seca(g)
0-10	0,1317 c
10-20	0,1635 b
20-30	0,2138 a
30-40	0,2178 a
C.V.	5,53%

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo Teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

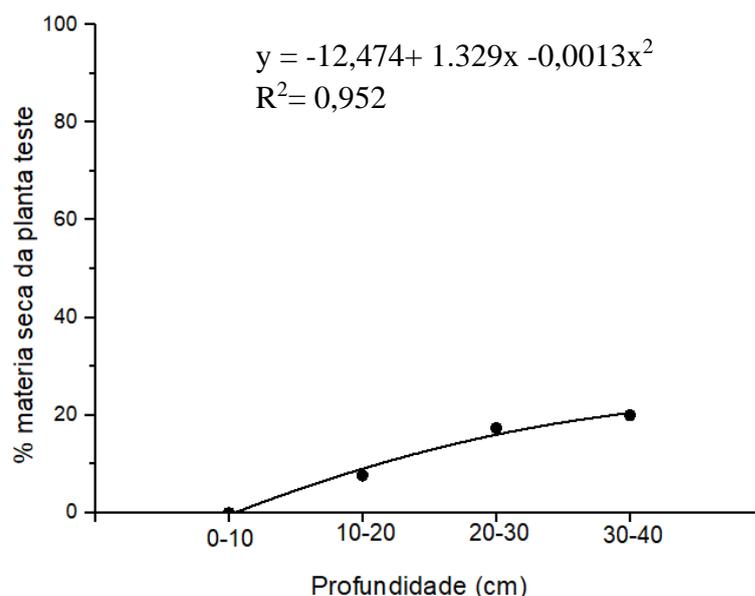


Figura 10. Acúmulo de matéria seca da plântula de pepino em relação à testemunha, em diferentes profundidades.

Os menores valores da matéria seca foram obtidos nas camadas superiores 0-10 e 10-20 cm, o que se deve, provavelmente, em função da maior concentração de moléculas do herbicida na solução do solo nessas camadas (Tabela 7). Reis *et al.* (2017) e Silva, T. *et al.* (2022) comprovaram a predisposição do diuron em se concentrar nas camadas superficiais de solos (0-15 cm) ao avaliar a lixiviação do herbicida aplicado isolado e em misturas em solos de diferentes texturas. Nesse estudo o herbicida diuron causou maiores sintomas de intoxicação e redução considerável da matéria seca da planta bioindicadora nas camadas de 20-30 cm e 30-40 cm, o que indica que o herbicida foi altamente lixiviado no perfil do solo (Figura 10).

O grande movimento do diuron nesses solos pode estar atrelado às características físico-químicas do solo, bem como a intensidade da chuva simulada. Nesta linha, Bandeira *et al.* (2022), estudaram a influência da precipitação na lixiviação do diuron e concluíram que mesmo com a pouca mobilidade do diuron no perfil do solo, esse herbicida pode representar um risco de contaminação das águas subterrâneas. Pois chuvas de grande intensidade podem causar uma lixiviação mais intensa desse herbicida, principalmente em solos com menor teor de matéria orgânica.

Matos *et al.* (2020) avaliaram o potencial de lixiviação dos herbicidas diuron e sulfentrazone usando mistura comercial e mistura em tanque em solos com diferentes texturas e observaram o aumento no movimento do diuron no perfil do solo com o aumento da quantidade de chuva acumulada. No solo de textura argilosa, na simulação de 40 mm de chuva

foi lixiviado 0,44% do diuron aplicado, enquanto chuvas acumuladas de 80 mm e 120 mm lixiviaram 5,96% e 16,65% do diuron aplicado, respectivamente.

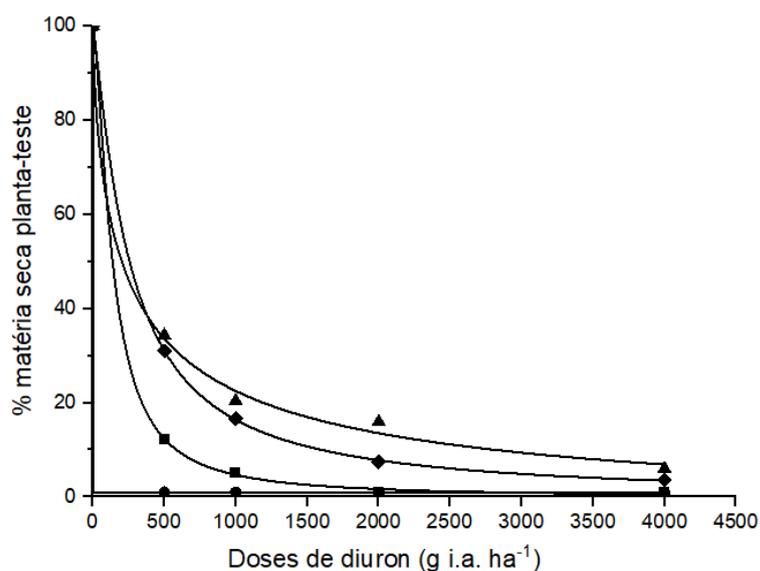
Nos estudos de Inoue *et al.* (2014), quando foi utilizado uma lâmina de água de 80 mm depois da aplicação do diuron houve inibição do crescimento da planta bioindicadora até a camada de 5-10 cm com amostras de Neossolo Quartzarênico (15 g kg^{-1} de C) e com o Latossolo Vermelho (43 g kg^{-1}) não houve redução da biomassa das plantas bioindicadora além da camada de 0-5 cm. Porém, na aplicação de lâminas de 100 mm de água foi possível detectar a atividade do diuron até a profundidade de 10-15 cm no Neossolo Quartzarênico e até a camada de 5-10 cm para o Latossolo Vermelho. Isto mostra que o teor da matéria orgânica, bem como a quantidade de água pode influenciar no movimento do diuron no perfil do solo.

Os solos avaliados possuem teor de matéria orgânica de 19,8 a $25,5 \text{ g. kg}^{-1}$ o que explicaria o movimento do diuron até os 40 cm de profundidade na aplicação de lâmina de 150 mm de água.

A chuva ou a irrigação interferem na lixiviação do herbicida, principalmente em sua intensidade e movimentação no perfil do solo no perfil do solo, pois os herbicidas são ineficientes quando pulverizados em secos (Schumann *et al.*, 2019).

Os impactos da precipitação na lixiviação de herbicidas dependem da intensidade e da duração. Chuvas e irrigação de alta frequência e alta intensidade após a aplicação de herbicidas podem aumentar o risco de lixiviação de herbicidas. (Guimarães *et al.*, 2018; Bandeira *et al.*, 2022). O excesso de água pode causar escoamento e aumentar o transporte de herbicida no perfil do solo e assim contaminar fontes de águas subterrâneas (Passos *et al.*, 2018; Guimarães *et al.*, 2018).

Em relação ao acúmulo de matéria seca em função das diferentes doses e profundidades constatou-se que o aumento da dose de diuron reduziu o acúmulo de matéria seca da plântula de pepino (figura 11), em todas as profundidades com a exceção da camada de 0-10 cm, em que houve morte total da planta teste, independentemente da dose aplicada, corroborando com a avaliação visual de intoxicação.



- Camada de 0-10 cm $y = -97,642 + 197,64 / (1 + (x/3,160^{-25})^{5,686-5})$ $R^2 = 1,000$
- Camada de 10-20 cm $y = 0,009 + 99,991 / (1 + (x/138,219)^{1,522})$ $R^2 = 0,999$
- ◆ Camada de 20-30 cm $y = -0,172 + 100,171 / (1 + (x/257,798)^{1,194})$ $R^2 = 0,999$
- ▲ Camada de 30-40 cm $y = -6,332 + 106,340 / (1 + (x/240,685)^{0,694})$ $R^2 = 0,999$

Figura 11. Lixiviação do diuron em solo cultivado com citros, coletados em quatro profundidades e submetidos a cinco doses de diuron.

Os menores valores de matéria seca foram obtidos com a dose de 4000 g h⁻¹ de i.a, já os maiores foram com a dose de 500 g h⁻¹ de i.a, em todas as profundidades de 10-40 cm (Figura 8). As doses de 2000 e 4000 g h⁻¹ de i.a causaram reduções superiores a 85% do peso da matéria seca das plântulas de pepino em relação à testemunha, nas profundidades de 20-30 e 30-40 cm. Nas mesmas camadas a dose de 1000 g h⁻¹ de i.a reduziu de 80 a 83 % o peso da matéria seca da planta bioindicadora.

Os índices de fitotoxicidade estão em concordância com a redução de matéria seca das plântulas de pepino, sendo que independentemente da dose aplicada, a redução da matéria seca foi identificada até os 40 cm. Tais fatos indicam uma alta capacidade do diuron no perfil desses solos.

Estudos realizados com água percolada em lisímetros detectaram nos lixiviados uma média de massa de diuron de 9,01 μg valor correspondente a 0,08% do total aplicado (Dores *et al.*, 2009). esse resultado segundo os autores indica potencial de contaminação de água subsuperficiais pelo herbicida.

A mobilidade do diuron no perfil do solo depende de vários fatores como: a natureza e conteúdo dos constituintes orgânicos e minerais do solo. em geral, o diuron apresenta baixo índice de adsorção e consequentemente, alto índice de lixiviação em solos com baixo teor de matéria orgânica (Chagas *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2019).

Os solos dos pomares de citros de Rio Preto da Eva e Iranduba apresentaram um teor de matéria orgânica de 19,9 e 25,8 g.kg⁻¹, respectivamente. A alta lixiviação do diuron nos solos sugere que o teor da matéria nesses não foi o suficiente para sorver o diuron e impedir a sua movimentação para camadas mais profundas. Matallo *et al.* (2003) avaliaram o potencial de lixiviação do diuron em dois solos e observaram maior mobilidade desse herbicida no solo com menor teor da matéria orgânica.

Em outros trabalhos, El-Nahhal *et al.* (2014) avaliaram a lixiviação do diuron em dois solos argilosos e um arenoso, relataram que mesmo com maior retenção do herbicida na parte superficial do solo, este também foi encontrado em profundidades de 16-20 cm devido à menor concentração da matéria orgânica no solo arenoso.

Os resultados aqui obtidos alertam sobre o potencial de lixiviação do diuron. A identificação de sintomas de fitotoxicidade e a redução da matéria seca até os 40 cm de profundidade, mesmo com doses menores que o indicado na literatura (MAPA, 2023) é um fato que merece atenção.

Segundo Araújo *et al.* (2012), embora o diuron seja classificado como pouco lixiviável pelo índice GUS, as características do solo em que esse herbicida é aplicado e a persistência do produto nesse solo podem mudar o seu potencial de lixiviação. Quando um herbicida permanece por muito tempo no solo sem ser adsorvido, degradado ou mineralizado, existe uma grande possibilidade de ser lixiviado.

Silva *et al.* (2019) estimaram o risco de lixiviação do diuron em diferentes solos com o uso de uma rede neural artificial e observaram que dos doze casos avaliados sete apresentaram de moderado a alto risco de lixiviação do diuron com base na menor meia vida ($t_{1/2}$), independentemente da região de coleta.

A alta lixiviação indica que a aplicação do diuron nos solos avaliados em doses inadequadas pode representar um risco tanto para as plantas cítricas quanto para o lençol freático. Pois a mobilidade do herbicida no solo pode alterar a sua capacidade e eficiência no controle de plantas daninhas e a sua dissipação no ambiente (Silva *et al.*, 2021).

Entretanto, para evitar as consequências de perdas de herbicidas por lixiviação pode-se adicionar resíduos orgânicos responsáveis por aumentar a sorção do herbicida no solo. Isso

consequentemente diminuirá a lixiviação desse herbicida (Duhan *et al.*, 2020; Magalhães *et al.*, 2022; Dong *et al.*, 2023). Além do aumento do teor matéria orgânica o seu conteúdo também é importante no comportamento dos herbicidas no solo, portanto isso deve ser levado em consideração na hora de adicionar os resíduos. (Rojas *et al.*, 2022).

6. CONCLUSÕES

O solo coletado no pomar de citros do Rio Preto da Eva apresentou maior capacidade de sorção de diuron, e a matéria orgânica contribuiu como principal componente de importância do solo na sorção de herbicida.

O diuron apresentou potencial de lixiviação nos materiais de solos pomares mesmo com doses menores que o recomendado. Desta forma, é importante conhecer as propriedades físico-químicas dos solos no momento de recomendação de doses do diuron, uma vez que processos como a sorção e a lixiviação estão diretamente ligados a eficiência de controle das plantas daninhas pelo herbicida.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, I. C. L. Sorção de diuron em minerais da fração argila. **Quim. Nova**, V. 35, N. 7, P. 1312-1317, 2012.
- AZCARATE, M. P.; MONTOYA, J. C.; KOSKINEN W. C. Sorption, desorption and leaching potential of sulfonyleurea herbicides in Argentinean soils. **Journal of environmental Science and Health**, Part B, v. 50, n. 4, p. 229-237, 2015.
- AZEVEDO, F. A.; ALMEIDA R. F.; MARTINELLI R.; PRÓSPERO A. G.; LICERRE R.; CONCEIÇÃO P. M.; ARANTES A. C. C., DOVIS V. L.; BOARETTO R. M.; MATTOS D. Jr. No-tillage and high-density planting for Tahiti acid lime grafted onto Flying Dragon trifoliolate orange. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, p. 1-14, art.108, 2020.
- AZEVEDO, M. M.; QUEIROZ, M. E. R.L.; SILVA, A. A.; NEVES, A. A.; OLIVEIRA, ANDRÉ F. de; MARTINS, M. L. S. R.; SILVA, T. L. R. Persistência do sulfentrazone em Argissolo puro ou Argissolo condicionado com carvão de bagaço de cana-de-açúcar. In: 19º ENQA - Encontro Nacional de Química Analítica e o 7º CIAQA - Congresso Iberoamericano de Química Analítica, 2018, Caldas Nova. 19º ENQA - Encontro Nacional de Química Analítica e o 7º CIAQA - **Congresso Iberoamericano de Química Analítica**, 2018.
- BANDEIRA, J. N. Leaching of Herbicides in Soil under the Influence of Different Rainfall Intensities. **Water Air Soil Pollut**, 233: 188, p. 1-9, 2022.
- BEZERRA, P. J. V. **Estimativas pelo método biológico da sorção, lixiviação e de doses do diuron em diferentes solos**. Dissertação. Universidade Federal de Viçosa, Fitotecnia, Minas Gerais, p. 71, 2022.
- BEZERRA, P. J. V.; RAVE, L. A. B.; de AGUIAR, A. M. C.; LAUBE, A. F. S.; LIMA, A. DA C.; D'ANTONINO, L.; da SILVA, A. A. Influence of Soil Attributes and Sorption Coefficient in Defining diuron Doses. **SSRN**, v.1, p. 1-24, 2023.
- CARVALHO, J. E. B. de; XAVIER, F. A. da S.; LUCENA, C. C. de; TORRES, L. S. G.; GOMEZ, D. R.; DAMASCENO, L. A.; SILVA, J. F. da. **Manejo de coberturas vegetais para controle de plantas daninhas e proteção do solo na citricultura do Amazonas**. Circular técnica 125. Embrapa Mandioca e Fruticultura. 11p. 2017.
- CHAGAS, P. S. F. D.; SOUZA, M. D. F.; DOMBROSKI, J. L. D.; JUNIOR, R. S. D. O.; NUNES, G. H. D. S.; PEREIRA, G. A. M.; SILVA, T. S.; PASSOS, A. B. R. J.; dos SANTOS, J. B.; SILVA, D. V. Multivariate analysis reveals significant diuron-related changes in the soil composition of different Brazilian regions. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, p. 7900, 2019.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; OVEJERO, R. F. L.; DAMIN, V.; CARVALHO, S. J. P. de; NICOLAI, M. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Edição pelos autores: Piracicaba, 2008. 90p.

CORREIA, N. M. **Comportamento dos herbicidas no ambiente**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2018, 30p.

DONG, Y.; LIU, X.; WU, X. Adsorption of diuron in black soil amended with biochar can predict its bioavailability to crops and earthworms. **Journal of Soils and Sediments**, p. 1-12, 2023.

DOS SANTOS, L. O. G.; SOUZA, M. D. F.; DAS CHAGAS, P. S. F.; FERNANDES, B. C. C.; SILVA, T. S.; DALLABONA DOMBROSKI, J. L.; SILVA, D. V. Effect of liming on hexazinone sorption and desorption behavior in various soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, p. 1-13, 2018.

DORES, E. F. G. C.; SPADOTTO, C. A.; WEBER, O. L.; CARBO, L.; VECCHIATO, A. B.; PINTO, A. A. Environmental behaviour of metolachlor and diuron in a tropical soil in the central region of Brazil. **Water, Air and soil Pollution**, v.197, n.14, p.175-183, 2009.

DUHAN, A.; OLIVER, D. P.; RASHTI, M. R.; DU, J.; KOOKANA, R. S. Organic waste from sugar mills as a potential soil ameliorant to minimise herbicide runoff to the Great Barrier Reef. **Science of the Total environment**, v.713, p. 136640, 2020.

DUQUE, T. S.; MACIEL, J. C.; SANTOS, J. B. dos; FERREIRA, E. A.; SOUZA, J. B. de. Use of plant bioindicators to identify residues of herbicides in the soil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e999998123, 2020.

EL-NAHHAL, Y.; ABADSA, M.; AFFIFI, S. Leaching potential of diuron and linuron in Gaza soils. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 26, p. 4040, 2014.

EL-NAHHAL, Y.; HAMDONA, N. Adsorption, leaching and phytotoxicity of some herbicides a single and mixtures to some crops. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Sciences**, v. 22, p. 17-25, 2017.

EUROPEAN WEED RESEARCH COUNCIL – EWRC. Report of 3rd and 4th meetings of EWRC Committee of Methods in Weed Research. **Weed Reserach**, v. 4, p. 88, 1964.

FARIA, A. T.; SOUZA, M. F.; PASSOS, A. B. R. de J.; da SILVA, A. A.; SILVA, D. V.; ZANUNCIO, J. C.; ROCHA, P. R. R. Tebuthiuron leaching in three Brazilian soils as affected by soil pH. **Environmental earth sciences**, v. 77, p.1-12, 2018.

FERREIRA, A. S. **Sorção do diuron e sulfentrazone em diferentes tipos de materiais, usados como substrato, para produção de mudas de citros no estado do Amazonas.**

Dissertação- Programa de Pós- Graduação Agronomia Tropical, Universidade Federal do Amazonas, p. 58, 2016.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental Aplicada à Agronomia**. MG: EDUFAL, 2000, 419p.

FREITAS, M.A.M.; PASSOS, A.B.R.J.; TORRES, L. G.; MORAES, H. M. F.; FAUSTINO, L. A.; ROCHA, P. R. R.; SILVA, A. A. Sorção do sulfentrazone em diferentes tipos de solo determinada por bioensaios. **Planta daninha**, v. 32, n. 2, p. 385-392, 2014.

GÉRARD, F. Clay minerals, iron/aluminum oxides, and their contribution to phosphate sorption in soils—A myth revisited. **Geoderma**, v. 262, p. 213-226, 2016.

GONÇALVES, G.; CARVALHO, J. E. B.; GARCIA, M. V. B.; GAMA, L. A.; AZEVEDO, C. L. L. L.; SILVA, J. F. Periods of weed interference on orange tree crops. **Planta daninha**, v. 36: e018179810, 2018.

GONÇALVES, G. S.; SILVA, J. F.; CALVACANTE, A. M. L.; ALBERTINO, S. M. F. Medida da sorção de herbicida no solo com planta-teste. Capítulo 19. P.107-111. In: Silva, J. F. *et al.* **Manual de aulas práticas de plantas daninhas**. Editora. Funep. 184p. 2013.

GUIMARÃES, A. C. D.; GUIMARÃES, A. C. D.; MENDES, K. F.; DOS REIS, F. C.; CAMPION, T. F.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; TORNISIELO, V. L. Role of soil physicochemical properties in quantifying the fate of diuron, hexazinone, and metribuzin. **Environmental Science and Pollution Research**, v.25, n. 13, p. 12419-12433, 2018.

HOFFMANN, R. B.; MOREIRA, É. E. A., HOFFMANN, G. S. da S.; ARAÚJO, N. S. F. de. Efeito do manejo do solo no carbono da biomassa microbiana. **Brazilian Journal of Animal and environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 168-178, 2018.

INOUE, M. H.; SILVA, A. C. P.; MENDES, K. F.; BEN, R.; MATOS, A. K. A. de.; SANTOS, E. G. D. Potencial de lixiviação de herbicidas utilizados na cana-de-açúcar em solos contrastantes. **Bioscience Journal**, v. 30, supplement 2, p. 659-665, 2014.

JIN, Y.; CHEN, S.; FAN, X.; SONG, H.; LI, X.; XU, J.; QIAN, H. Diuron treatment reveals the different roles of two cyclic electron transfer pathways in photosystem II in *Arabidopsis thaliana*. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 137, p. 15-20, 2017.

LAVORENTI, A. Comportamento dos herbicidas no solo. **Encontro brasileiro de substâncias húmicas**, v. 3, p. 21-34, 1999.

LI, F.; PAN, B.; LIANG, N.; CHANG, Z.; ZHOU, Y.; WANG, L.; LI, H.; XING, B.

Reactive mineral removal relative to soil organic matter heterogeneity and implications for organic contaminant sorption. **Environmental Pollution**, v. 227, p. 49-56, 2017.

MAGALHÃES, T. F. da S.; BARBOSA, A. G.; GOLIN, R.; TEREZO, A. J.; VASCONCELOS, L. G. de.; MORAIS, E. B. de. Síntese de hidrocarvão a partir da casca do fruto de bocaiuva e sua aplicação na remoção de diuron de água contaminada. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 486-494, 2022.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons . Acesso em: 25 jun 2023.

MARINHO, M. I. C.; SOUZA, W. M.; CABRAL, M. F.; CASTRO NETO, M. D.; QUEIROZ, M. E. L. R.; SILVA, A. A. Sorption-desorption behavior of imazethapyr and imazapic on six Brazilian soils. **Planta Daninha**, v. 36: e018177486, p. 1-12, 2018.

MARTINELLI, R.; MONQUERO, P. A.; FONTANETTI, A.; CONCEIÇÃO, P. M.; AZEVEDO, F. A. Ecological mowing: An option for sustainable weed management in young citrus orchards. **Weed Technology**, v. 31, p. 260-268, 2017.

MARTINELLI, R.; RUFINO Jr, L. R.; ALCÁNTARA, R. de la C.; da CONCEIÇÃO, P. M.; MONQUERO, P. A.; de AZEVEDO, F. A. Glyphosate excessive use affects citrus growth and yield: The vicious (and unsustainable) circle in Brazilian orchards. **Agronomy**, v. 12, n. 2, p. 453, 2022.

MATOS A. K. A.; CARBONARI, C. A.; BRITO, F.S. I. P.; GOMES, L. G. C. G.; TRINDADE, M. L.; VELINI, E. D. Dynamics of diuron and sulfentrazone formulations in soils with different textures. **Planta Daninha**, v. 38, p. 1-8, 2020.

MATALLO, M. B.; LUCHINI, L. C.; GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; CERDEIRA, A. L.; MARIN, G. C. Lixiviação dos herbicidas tebutiuron e diuron em colunas de solo. **Pesticidas: revista de ecotoxicologia e meio ambiente**, v. 13, p. 83-90, 2003.

MENDES, K. F.; MENDES, K. F.; dos REIS, M. R.; INOUE, M. H.; PIMPINATO, R. F.; TORNISIELO, V. L. Sorption and desorption of mesotrione alone and mixed with S-metolachlor+ terbuthylazine in Brazilian soils. **Geoderma**, v. 280, p. 22-28, 2016.

MONQUERO, P. A.; SILVA, P. V. Comportamento de herbicidas no ambiente. In: BARROSO, A. A. M.; MURATA, A. T. (Orgs). **Matologia: estudos sobre plantas daninhas**. Jaboticabal, SP: Fábrica da Palavra, 2021. p.253-294.

NORDMEYER, H. Herbicide application in precision farming based on soil organic matter. **American Journal of experimental Agriculture**, v. 8, n. 3, p. 144-151, 2015.

OKADA, E.; COSTA, J. L.; BEDMAR, F. Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no-till and conventional tillage. **Geoderma**, v. 263, p. 78-85, 2016.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M. Comportamento dos herbicidas no ambiente. In: Oliveira JR, *et al.* (eds.). **Biologia e Manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011, p.263-304.

OLIVEIRA, R. S. Jr.; BIFFE, D. F.; MACHADO, F. G.; SILVA, V. F. V. Mecanismos de ação de herbicidas. In: BARROSO, A. A. M.; MURATA, A. T. (Orgs). **Matologia: estudos sobre plantas daninhas**. Jaboticabal, SP: Fábrica da Palavra, 2021. p.170-204.

PASSOS, A. B. R. J.; SOUZA, M. F.; SARAIVA, D. T.; da SILVA, A. A.; QUEIROZ, M. E. L.; CARVALHO, F. P.; SILVA, D. V. Effects of liming and *Urochloa brizantha* management on leaching potential of picloram. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 230, p. 1-8, 2019.

PASSOS, A. B. R. J.; FREITAS, M. A. M.; GONÇALVES, V. A.; SILVA, G. S.; DA SILVA, A. A.; QUEIROZ, M. E. L.; LIMA, C. F.; SILVA, D. V. Leaching of sulfentrazone in soils of reforestation in Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, p. 1211-1215, 2015.

PASSOS, A. B. R. J.; SOUZA, M. F.; SILVA, D. V.; SARAIVA, D. T.; da Silva, A. A.; ZANUNCIO, J. C.; GONÇALVES, B. F. S. Persistence of picloram in soil with different vegetation managements. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 23986-23991, 2018.

PAVÃO, Q. S.; FREITAS SOUZA, M. D.; TEÓFILO, T. M. S.; LINS, H. A.; BORGES, M. P. S.; SILVA, T. S.; PASSOS, A. B. R. J.; SILVA, D. V. Understanding the behavior of sulfometuron-methyl in soils using multivariate analysis. **International Journal of Environmental Science and Technology**, p. 1-12, 2021.

PEREIRA, G. A. M.; BARCELLOS, L.; GONÇALVES, V. A.; SILVA, D. V.; SILVA, A. A. Clomazone leaching estimate in soil columns using the biological method. **Planta Daninha**, v. 35, p. 1-7, 2017.

PETTER, F. A.; FERREIRA, T. S.; SINHORIN, A. P.; LIMA, L. B. D.; MORAIS, L. A. D.; PACHECO, L. P. Sorption and desorption of diuron in Oxisol under biochar application. **Bragantia**, v. 75, p. 487-496, 2016.

PINHEIRO, J. O. C.; GARCIA, M.; CYSNE, A.; SILVA, L. D. J.; GARCIA, T. **Coefficientes técnicos, custo de produção e análise econômico-financeira do cultivo de laranjeiras para a região metropolitana de Manaus**. Embrapa Amazônia Ocidental. Circular Técnica, 76, 2019, 21 p. ISSN1517-2449.

PORFIRI, C.; MONTOYA, J. C.; KOSKINEN, W. C.; AZCARATE, M. P. Adsorption and transport of imazapyr through intact soil columns taken from two soils under two tillage systems. **Geoderma**, v. 251, p. 1-9, 2015.

PPDB, 2023. Pesticide properties database. University of Hertfordshire. Disponível em: <<http://sitem.herts.ac.uk/aeru/iupac/Reports/775.htm#none>>. Acesso em: 20 jun. 2023

REBELLO, F. K.; FERREIRA, I. V. L.; BRÍGIDA, M. R. S. S.; dos SANTOS, M. A. S. Conjuntura e perspectiva da citricultura no estado do Pará. In: HOMMA, A. K. O. (ed.). **Sinergias de mudança da agricultura amazônica: conflitos e oportunidades**. Brasília: Embrapa, 2022. p. 403-425.

REFATTI, J. P.; AVILA, L. A. D.; AGOSTINETTO, D.; MANICA-BERTO, R.; BUNDT, A. D. C.; ELGUEIRA, D. B. Efeito da calagem na lixiviação de imazethapyr e imazapyr em solo de cultivo de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v. 44, p. 1008-1014, 2014.

REIS, F. C.; TORNISIELO, V. L.; PIMPINATO, R. F.; MARTINS, B. A.; VICTÓRIA Filho, R. Leaching of diuron, hexazinone and sulfometuron-methyl applied alone and in mixture in soils with contrasting textures. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 65, p.2645-2650, 2017.

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

ROJAS, R.; REPETTO, G.; MORILLO, J.; USERO, J. Sorption/desorption and kinetics of atrazine, chlorfenvinphos, endosulfan sulfate and trifluralin on agro-industrial and composted organic wastes. **Toxics**, v. 10, n. 2, p. 85, 2022.

RUBIO-BELLIDO, M.; MORILLO, E.; VILLAVERDE, J. Effect of addition of HPBCD on diuron adsorption-desorption, transport and mineralization in soils with different properties. **Geoderma**, v. 265, p. 196-203, 2016.

SANTOS, E. A.; CORREIA, N. M.; SILVA, J. R. M.; VELINI, E. D.; PASSOS, A. B. R. J.; DURIGAN, J. C. Herbicide detection in groundwater in Córrego Rico-SP watershed. **Planta Daninha**, v. 33, p. 147-155, 2015.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SCHUHMANN, A.; KLAMMLER, G.; WEISS, S.; GANS, O.; FANK, J.; HABERHAUER, G.; GERZABEK, M. H. Degradation and leaching of bentazone, terbuthylazine and S-metolachlor and some of their metabolites: A long-term lysimeter experiment. **Plant, Soil and Environment**, v. 65, n. 5, p. 273-281, 2019.

SEBASTIAN, D. J.; NISSEN, S. J.; WESTRA, P.; SHANER, D. L.; BUTTERS, G. Influence of soil properties and soil moisture on the efficacy of indaziflam and flumioxazin on *Kochia scoparia* L. **Pest management science**, v. 73, n. 2, p. 444-451, 2017

SHANER, D. L. Herbicide Handbook, 10th ed.; **Weed Science Society of America**: Champaign, 2014.

SILVA, A. A. da; D'ANTONINO, L.; VIVIAN, R.; OLIVEIRA JR., R. S. Comportamento de herbicidas no solo. In: MONQUERO, P. A. (Ed.). **Aspectos da Biologia e Manejo das Plantas Daninhas**. São Carlos: Rima, 2014. p. 165–216.

SILVA, T. S.; SOUZA, M. de F.; TEÓFILO, T. M. da S.; dos SANTOS, M. S.; PORTO, M. A. F.; SOUZA, C. M. M.; dos SANTOS J. B.; SILVA, D. V. Use of neural networks to estimate the sorption and desorption coefficients of herbicides: A case study of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl in Brazil. **Chemosphere**, v. 236, p. 124333, 2019.

SILVA, T. S.; de MEDEIROS, R. D. C. A.; SILVA, D. V.; SOUZA, M. de F.; das CHAGAS, P. S. F.; LINS, H. A.; da SILVA, C. C.; SOUZA, C. M. M.; MENDONÇA, V. Interaction between herbicides applied in mixtures alters the conception of its environmental impact. **Environmental Science and Pollution Research**, p. 1-17, 2022.

SILVA, C. C. D.; ALMEIDA, A. H. B. D.; FREITAS, D. V. D.; SILVA, F. D. D.; CHAGAS, P. S. F. D.; SILVA, D. V. Sorption, desorption, half-life and leaching of sulfometuron-methyl in different soil classes. **Revista Caatinga**, v. 35, p. 557-566, 2022.

SONDHIA, S.; KHARE, R. R. Soil adsorption studies of a rice herbicide, cyhalofop-butyl, in two texturally different soils of India. **Environmental monitoring and assessment**, v. 186, p. 5969-5976, 2014.

SOUSA, G. V.; PEREIRA, G. A. M.; TEIXEIRA, M. F. F.; FARIA, A. T.; PAIVA, M. C. G.; SILVA, A. A. Sorption and desorption of diuron, hexazinone and mix (diuron+ hexazinone) in soils with different attributes. **Planta Daninha**, v. 36, p. e018176803, 2018.

TANGTONG, C. **Environmental processes controlling the fate and transport of aristolochic acid in agricultural soil and copper in contaminated lake sediment**. Michigan State University, 2014.

TANTARAWONGSA, P.; KETROT, D. Adsorption of Herbicide Diuron in Pineapple-Growing Soils of Eastern Thailand. **Polish Journal of Environmental Studies**, v.29, n.1, p.285-292, 2020.

USDA. Citrus: World Markets and trade. Foreign Agricultural Service, January 2023, Disponível em: Acesso em: 22 de jun. 2023.

VILLAVERDE C. J.; RUBIO BELLIDO, M.; MERCHÁN, F.; MORILLO GONZÁLEZ, E.
Bioremediation of diuron contaminated soils by a novel degrading microbial consortium.
Journal of environmental Management, v. 188, p. 379-386, 2017.

WANG, D.; MUKOME, F. N.; YAN, D.; WANG, H.; SCOW, K. M.; PARIKH, S. J.
Phenylurea herbicide sorption to biochars and agricultural soil. **Journal of environmental
Science and Health**, Part B, v. 50, n. 8, p. 544-551, 2015.