



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

ARTHUR ALLAN SENA DE OLIVEIRA

**IMPACTO E COMPORTAMENTO DIFERENCIAL DE ESPÉCIES FLORESTAIS
EM RESPOSTA À CONTAMINAÇÃO POR 2,4-D**

MOSSORÓ

2025

ARTHUR ALLAN SENA DE OLIVEIRA

**IMPACTO E COMPORTAMENTO DIFERENCIAL DE ESPÉCIES FLORESTAIS
EM RESPOSTA À CONTAMINAÇÃO POR 2,4-D**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de solo e Água.

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água

Orientador: Prof. Dr. Daniel Valadão Silva

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Fernandes das Chagas

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48i Oliveira, Arthur Allan Sena de.
Impacto e comportamento diferencial de
espécies florestais em resposta à contaminação por
2,4-D / Arthur Allan Sena de Oliveira. - 2025.
60 f. : il.

Orientador: Daniel Valadão Silva.
Coorientador: Paulo Sérgio Fernandes das
Chagas.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2025.

1. Caatinga. 2. Pesticida. 3. Biodiversidade.
4. Impacto ambiental. I. Silva, Daniel Valadão,
orient. II. Chagas, Paulo Sérgio Fernandes das,
co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

ARTHUR ALLAN SENA DE OLIVEIRA

**IMPACTO E COMPORTAMENTO DIFERENCIAL DE ESPÉCIES FLORESTAIS
EM RESPOSTA A CONTAMINAÇÃO POR 2,4-D**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutor em Manejo de Solo e Água

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água

Defendida em: 29/ 05 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL VALADAO SILVA**
Data: 26/08/2025 07:47:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel Valadão Silva, Prof. Dr. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente
 **JOSE BARBOSA DOS SANTOS**
Data: 26/08/2025 07:43:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Barbosa dos Santos Prof. Dr. (University of Florida)

Documento assinado digitalmente
 **FRED AUGUSTO LOUREDO DE BRITO**
Data: 24/08/2025 12:36:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fred Lourêdo de Brito, Prof. Dr. (UFERSA)

Documento assinado digitalmente
 **ANE CRISTINE FORTES DA SILVA**
Data: 24/08/2025 13:10:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ane Cristine Fortes da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador
Documento assinado digitalmente
 **TATIANE SEVERO SILVA**
Data: 24/08/2025 12:13:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tatiane Severo Silva, Profa Dra. (University of Wisconsin-Madison)
Membro Examinador

Aos meus avôs Raimundo Nonato (em memória) e Custódio Clementino (em memória), pelo exemplo de humanidade, dedicação e amor por suas famílias.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me presenteado com o dom da vida e por interceder por mim.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, pela oportunidade de formação acadêmica.

Aos meus pais, Gilberto Clementino e Jeine Souza, pelo apoio e amor incondicional.

Aos meus irmãos, Bruno Vinícius e Ana Beatriz, pelo apoio e companheirismo.

À minha companheira, Tayrine, pela compreensão, carinho, cuidado, amor e por sempre acreditar na minha capacidade.

À minha avó Francisca de Souza Sena, pelo amor incondicional e por sempre apoiar e incentivar o caminho da educação.

À professora Carolina Malala, por ser um exemplo de profissional, por acreditar no meu potencial e sempre me incentivar a evoluir profissionalmente.

Ao professor Daniel Valadão Silva, pelo exemplo de profissional e de ser humano, pelo qual tenho enorme estima e sempre serei grato pela orientação, apoio, ensinamentos e amizade.

Ao Professor Paulo Sérgio Fernandes das Chagas, por todo o apoio e orientação durante a minha graduação e doutorado. Você é um exemplo de excelência profissional.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água e aos colaboradores do LASAP, que compartilharam seu conhecimento e experiência com sabedoria.

À banca examinadora, por toda a dedicação nas revisões e pelas contribuições neste trabalho.

Aos meus amigos e amigas de equipe, Mayara, Carolina, Valdivia, Luma, Daniele, Lyandra, Cecília, Ana, Bianca, Lucrécia, Cydiane, Jesley, Matheus, Taliane, Hámurabi, Vinicius, Erick, Robert, Afonso, Abraão, Larissa, Diego, Daniel, Micael, Cristhiane, Bruno, Gabriel, Heitor, Caio, Venizio, Luiz, Everson e Raquel.

Aos meus amigos e amigas do PPGMSA e do LASAPSA, pelo convívio e carinho, Alcigério, Helena, Lunara, Alrivan, Rodrigo, Éder, Maiky, Fágner, Gabriela, Vanies, Jandeilson, Isabela, Valdigleza, Pedro, Marcondes, Paulo, Dárcio, Luciara e tantos outros que fizeram parte desta etapa, minha gratidão.

A todos os que de alguma forma contribuíram para a execução deste trabalho e para a minha formação profissional neste período, minha gratidão.

Na vida, não existe nada a se temer, apenas a
ser compreendido.

Marie Curie

RESUMO GERAL

O uso contínuo e intensivo de produtos químicos na agricultura pode ocasionar impactos ambientais irreversíveis. O uso de herbicidas em áreas próximas a mata nativa e de preservação pode impactar negativamente a fauna e flora desse ambiente. Nesse sentido, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da contaminação de 2,4-D em água subterrânea e por via deriva em espécies florestais presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiro. O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido. No experimento de contaminação por água subterrânea (artigo 1), os tratamentos foram arranjos em fatorial 10×2 , o primeiro fator corresponde a dez espécies florestais e o segundo fator corresponde à presença e ausência de 2,4-D em água subterrânea, com quatro repetições. Após o período de 35 dias de condução, foram realizadas análises morfológicas como a contagem do número de folhas, área foliar, altura da planta, massa seca da folha, do caule, da raiz e a total para avaliar a sensibilidade das espécies a esse tipo de contaminação. A contaminação de 2,4-D via água subterrânea afetou o número de folhas das espécies *Mimosa tenuiflora* e *Tabebuia aurea*. Os demais parâmetros morfológicos não sofreram alterações em decorrência da exposição ao 2,4-D via água subterrânea. O consumo e a eficiência no uso da água pelas espécies florestais não foram afetados pela contaminação de 2,4-D em água subterrânea. A dissipação do 2,4-D no solo de todas as espécies florestais foi maior do que 90%. O experimento de deriva simulada (artigo 2) foi arranjado em fatorial 10×5 , sendo o primeiro fator correspondente a dez espécies florestais e o segundo fator corresponde a cinco concentrações (0; 33,5; 67,0; 100,5; 134 g.e.a.ha⁻¹) de 2,4-D, simulando a deriva de 0, 5, 10, 15 e 20 % da dose recomendada do herbicida. Após 35 dias da deriva de 2,4-D, foram avaliadas a fitointoxicação visual, número de folhas, área foliar, altura da planta, comprimento radicular, peso da massa seca da folha, do caule, da raiz e a total. As espécies apresentaram sensibilidade quando expostas à deriva simulada de 2,4-D. Os principais sintomas de intoxicação visual observado nas espécies foram epinastia e necrose foliar. A deriva simulada do herbicida 2,4-D impactou negativamente os parâmetros morfológicos avaliados de algumas espécies. As espécies *Ceiba glaziovii* e *Handroanthus impetiginosus* foram as que apresentaram sintomas graves de intoxicação visual, como epinastia, clorose e necrose grave quando expostas à deriva de 20% de 2,4-D. Os sintomas de intoxicação causados por 2,4-D nas espécies florestais estudadas sugerem que esse herbicida tem potencial para ser um agente selecionador quando transportado via deriva.

Palavras-Chave: Caatinga. Pesticida. Biodiversidade. Impacto ambiental.

GENERAL ABSTRACT

The continuous and intensive use of chemicals in agriculture can cause irreversible environmental impacts. The use of herbicides in areas close to native forests and conservation areas can negatively impact the fauna and flora of these environments. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of 2,4-D contamination in groundwater and via drift on forest species present in the Brazilian Caatinga and Cerrado biomes. The experiment was conducted in a greenhouse at the Federal Rural University of the Semi-Arid Region. In the groundwater contamination experiment (article 1), treatments were arranged in a 10×2 factorial arrangement, with the first factor corresponding to 10 forest species and the second factor corresponding to the presence or absence of 2,4-D in groundwater, with four replicates. After the 35-day experiment, morphological analyses were performed, including leaf counts, leaf area, plant height, and leaf, stem, root, and total dry mass, to assess the species' sensitivity to this type of contamination. Groundwater contamination of 2,4-D affected the leaf number of *Mimosa tenuiflora* and *Tabebuia aurea*. Other morphological parameters were not affected by groundwater exposure to 2,4-D. Water consumption and water use efficiency of forest species were not affected by groundwater contamination. 2,4-D dissipation in the soil of all forest species was greater than 90%. The simulated drift experiment (article 2) was arranged in a 10×5 factorial, with the first factor corresponding to ten forest species and the second factor corresponding to five concentrations (0; 33.5; 67.0; 100.5; 134 g.e.a.ha⁻¹) of 2,4-D, simulating drift of 0, 5, 10, 15, and 20% of the recommended herbicide dose. After 35 days of 2,4-D drift, visual phytotoxicity, leaf number, leaf area, plant height, root length, and dry weight of leaves, stems, roots, and total plant mass were evaluated. The species showed sensitivity when exposed to simulated 2,4-D drift. The main symptoms of visual toxicity observed in the species were epinasty and leaf necrosis. Simulated 2,4-D drift negatively impacted the morphological parameters evaluated in some species. *Ceiba glaziovii* and *Handroanthus impetiginosus* were the species that presented severe symptoms of visual toxicity, such as epinasty, chlorosis, and severe necrosis, when exposed to 20% 2,4-D drift. The symptoms of toxicity caused by 2,4-D in the studied forest species suggest that this herbicide has the potential to be a selection agent when transported via drift.

Keywords: Caatinga. Pesticide. Biodiversity. Environmental impact.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 - SIMULAÇÃO DO IMPACTO EM ESPÉCIES FLORESTAIS DA CONTAMINAÇÃO DE 2,4-D EM ÁGUA SUBSUPERFICIAL

Figura 1. Massa seca da folha, caule, raiz e total de espécies florestais presentes nos biomas da Caatinga e Cerrado brasileiro.	30
Figura 2. Consumo de água (L) e eficiência no uso da água (E.U.A., g/L) de diferentes espécies sob duas condições: controle e presença de herbicida 2,4-D	32
Figura 3. Estimativa da massa adicionada de 2,4-D em espécies florestais.....	33
Figura 4. Concentração residual de 2,4-D no solo.	34
Figura 5. Estimativa da concentração no solo e dissipação do 2,4-D	35

ARTIGO 2 – HERBICIDA COMO FILTRO FLORÍSTICO: SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA DERIVA DE 2,4-D SOBRE ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA E DO CERRADO BRASILEIRO

Figura 1. Peso da biomassa seca de espécies florestais dos biomas da Caatinga e do Cerrado, submetidas à deriva simulada de 2,4-D.	52
Figura 2. Porcentagem de intoxicação em mudas de espécies florestais dos Biomas da Caatinga e Cerrado submetidas a subdoses do herbicida 2,4-D.	56

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 - SIMULAÇÃO DO IMPACTO EM ESPÉCIES FLORESTAIS DA CONTAMINAÇÃO DE 2,4-D EM ÁGUA SUBSUPERFICIAL

Tabela 1. Caracterização química e física dos atributos do solo	26
Tabela 2. Caracterização química da água.....	26
Tabela 3. Número de folhas, altura e área foliar de mudas de espécies nativas dos biomas da Caatinga e do Cerrado submetidas à contaminação de 2,4-D em água subterrânea.....	28

ARTIGO 2 – SENSIBILIDADE DE ESPÉCIES FLORESTAIS DOS BIOMAS DA CAATINGA E DO CERRADO SUBMETIDAS A DERIVA SIMULADA DE 2,4-D

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo	45
Tabela 2. Número de folhas de espécies florestais dos biomas da Caatinga e Cerrado, submetidas à contaminação por deriva do herbicida 2,4-D.	46
Tabela 3. Área foliar (cm ²) de espécies florestais pertencentes aos biomas da Caatinga e Cerrado submetidas à deriva simulada do herbicida 2,4-D.	47
Tabela 4. Altura de espécies florestais pertencentes aos biomas da caatinga e do Cerrado brasileiro expostas à contaminação por deriva do herbicida 2,4-D.	50
Tabela 5. Comprimento de raiz de espécies florestais dos biomas da Caatinga e Cerrado submetidas à deriva simulada do herbicida 2,4-D.	51

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DCAF – Departamento de Ciências Agrárias e Florestais

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

PVC – Policloreto de vinila

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17
ARTIGO 1: SIMULAÇÃO DO IMPACTO EM ESPÉCIES FLORESTAIS DA CONTAMINAÇÃO DE 2,4-D EM ÁGUA SUBSUPERFICIAL.....	21
RESUMO.....	21
ABSTRACT.....	22
INTRODUÇÃO.....	23
MATERIAL E MÉTODOS	25
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
CONCLUSÕES.....	36
REFERÊNCIAS.....	36
ARTIGO 2: HERBICIDA COMO FILTRO FLORÍSTICO: SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA DERIVA DE 2,4-D SOBRE ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA E DO CERRADO BRASILEIRO	41
RESUMO.....	41
ABSTRACT.....	42
INTRODUÇÃO.....	43
MATERIAL E MÉTODOS	44
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS.....	58

INTRODUÇÃO GERAL

O aumento da população mundial, principalmente desde o início do século 20, tem exigido a modernização da produção de alimentos no setor agrícola, com ênfase no aumento da produtividade, qualidade dos alimentos e segurança alimentar (Li *et al.*, 2024). Para suprir a necessidade mundial de alimentos, o setor agrícola tem passado por significativas mudanças, como a otimização dos processos, qualificação profissional no campo e o uso de tecnologias que proporcionem aumento sustentável da produção (Hoek *et al.*, 2021; Huang *et al.*, 2022; Viana *et al.*, 2022). Dentre as tecnologias utilizadas para aumentar a produção e qualidade dos alimentos na agricultura, se destacam os agrotóxicos (Marcato, Souza e Fontanetti, 2017).

Os agrotóxicos são substâncias ativas amplamente utilizadas no setor agrícola para promover a proteção e controle de pragas que podem causar danos durante a produção no campo, processamento, armazenamento, transporte e comercialização (Kumar e Kumar, 2019; Goulart *et al.*, 2020). Neste grupo diversificado de compostos químicos se destacam os fungicidas, inseticidas e herbicidas (Marcato, Souza e Fontanetti, 2017; Goulart *et al.*, 2020). Esses últimos são utilizados para o controle de plantas daninhas e estão entre os agroquímicos mais utilizados mundialmente (Pérez-Lucas *et al.*, 2020).

A presença de plantas daninhas está entre os principais fatores que provocam danos às culturas e redução na produção (Kusumavathi *et al.*, 2025). Estima-se que 34% das perdas de rendimento nas culturas em todo o mundo estejam relacionados à interferência e ao manejo inadequado das plantas daninhas (Kumar *et al.*, 2022). Portanto, a produção agrícola economicamente viável depende do controle eficiente dessas plantas (Das *et al.*, 2024).

Devido à eficiência dos herbicidas no controle de plantas daninhas, facilidade e rapidez na aplicação, utilização em áreas extensas, positiva relação custo-benefício e escassez de mão de obra, surgiu um cenário de dependência destes agroquímicos na agricultura convencional (Das *et al.*, 2024).

O controle químico de plantas daninhas teve início com a síntese do primeiro herbicida orgânico e com a ampla utilização do ácido 2,4-D-diclorofenoxiacético, abreviação 2,4-D, em 1941 (Peterson *et al.*, 2016; Islam *et al.*, 2018). Esse fato foi tão importante para a agricultura mundial que atualmente o 2,4-D é registrado como ingrediente em, aproximadamente, 1500 produtos, como único ingrediente ativo ou em conjunto com outros ingredientes ativos (Islam *et al.*, 2018).

O 2,4-D é um herbicida com translocação sistêmica na planta, aplicado em pré e pós-emergência, pertencente ao grupo químico do ácido ariloxialcanóico (Butova *et al.*, 2024). O

modo de ação do 2,4-D, por se tratar de uma auxina sintética, caracteriza-se pelo aumento da plasticidade da parede celular e aumento anormal de proteínas e etileno (Pinto *et al.*, 2023). Essa ação resulta em divisão celular descontrolada e danos ao tecido vascular das plantas (Marcato, Souza e Fontanetti, 2017).

O 2,4-D é um dos principais herbicidas utilizados em países desenvolvidos e fortemente inseridos no mercado de países em desenvolvimento, principalmente aqueles em que o setor agrícola impulsiona a economia (Kelly e Reichers, 2007; Zuanazzi *et al.*, 2020). No Brasil, de acordo com os dados publicados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), fornecidos pelas empresas titulares de registros de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme o art. 41 do Decreto nº 4.074/2002, com redação dada pelo Decreto nº 10.833 de 2022, o 2,4-D foi o segundo herbicida mais vendido no Brasil em 2023, com aproximadamente 51.872,24 toneladas de ingrediente ativo, ficando atrás do glifosato e seus sais, que vendeu cerca de 253.301,95 toneladas de ingrediente ativo (IBAMA, 2023). O 2,4-D é registrado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para utilização nas culturas do trigo, milho, soja, arroz, aveia, sorgo, cana-de-açúcar, café, citros e pastagem (MAPA, 2024).

Embora o uso de herbicidas auxilie no aumento da produção e na qualidade dos alimentos, o uso intensivo desses compostos químicos tem gerado preocupação em todo o mundo sobre os prováveis impactos negativos ao meio ambiente e a saúde humana (Durães *et al.*, 2018; Freitas *et al.*, 2019; Goulart *et al.*, 2020; Benavides-Piracón *et al.*, 2022; Kaur *et al.*, 2024). A contaminação por herbicidas e a presença de resíduos desses compostos na água, solo, ar, alimentos e organismos não alvo estão entre os maiores obstáculos à sustentabilidade agrícola e ambiental (Swartjes e Van der Aa, 2020; Barroso *et al.*, 2023; Ruuskanen *et al.*, 2023).

Após a aplicação, os herbicidas podem interagir com diversos componentes ambientais ou sofrer transporte para áreas adjacentes, a partir da volatilização ou deriva, ser transportados para águas superficiais e subterrâneas por meio de escoamento superficial e lixiviação, atingindo, assim, organismos não alvo (Brauns *et al.*, 2018; Yorlano *et al.*, 2022).

O transporte de herbicidas por meio de deriva e escoamento superficial pode provocar impacto negativo na biodiversidade em ecossistemas próximos ou distantes do local de aplicação (Brochado *et al.*, 2022). No Brasil, a deriva de 2,4-D foi observada em 2018 em culturas sensíveis como uva, azeitonas, pêssegos e hortaliças, sendo o uso suspenso no estado do Rio Grande do Sul em 2019 (SEAPDR, 2021).

A distribuição dos agrotóxicos no ambiente e sua biodisponibilidade, que determinam sua toxicidade e impacto na biota não alvo, dependem de características físico-químicas do

herbicida e das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente (Yorlano *et al.*, 2022). A degradação de herbicidas pode provocar a formação de compostos com capacidade de contaminação ainda maiores (Borges *et al.*, 2021). Para o herbicida 2,4-D, por exemplo, as rotas de degradação ambiental são bastante complexas e podem resultar em diversos compostos, potencialmente mais poluidores do que próprio herbicida (Goulart *et al.*, 2020).

A extensão dos impactos decorrentes da contaminação dos herbicidas no meio ambiente depende de muitos fatores interrelacionados e é específica de cada local (Yorlano *et al.*, 2022). Portanto, é indispensável a compreensão sobre a dinâmica de herbicidas no ambiente para garantir recomendações seguras e eficazes do ponto de vista técnico e ambiental (Pand e Mishra, 2024).

A expansão da fronteira agrícola, associada à crescente utilização de agrotóxicos, tem causado preocupação sobre o efeito desses compostos em espécies florestais próximas a áreas agrícolas (Yorlano *et al.*, 2022; Ruuskanen *et al.*, 2023). Esse cenário é ainda mais alarmante no Brasil por ser um dos maiores consumidores de agrotóxicos do mundo, com destaque para o glifosato e o 2,4-D, os herbicidas mais vendidos (IBAMA, 2023). Esse consumo intensivo de herbicidas é reflexo da expansão agrícola no Nordeste e Centro-Oeste do Brasil, onde estão localizados predominantemente os biomas da Caatinga e Cerrado brasileiro, para a produção de *commodities* como soja, milho e algodão (Lahsen *et al.*, 2016).

Estudos englobando os biomas brasileiros são importantes para a compreensão dos impactos ocasionados pela contaminação de herbicidas em espécies florestais. Algumas pesquisas reforçam que herbicidas podem atuar como agente de seleção em espécies florestais presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiro (Borges *et al.*, 2021; Cabral *et al.*, 2023; Nogueira Neto *et al.*, 2024), entretanto estudos sobre o impacto de herbicidas auxínicos como o 2,4-D em espécies presentes na Caatinga e no Cerrado brasileiro são escassos.

A contaminação por herbicidas por via deriva e água subterrânea em baixas concentrações pode impactar negativamente os parâmetros morfológicos e fisiológicos de espécies florestais pertencentes aos biomas da Caatinga e Cerrado brasileiro (Borges *et al.*, 2021; Cabral *et al.*, 2023; Nogueira Neto *et al.*, 2024). Reduções do número de folhas, altura, peso da massa seca total, taxa fotossintética, trocas gasosas e eficiência no uso da água são observadas em espécies florestais pertencentes a esses biomas, quando expostas a herbicidas (Borges *et al.*, 2021; Cabral *et al.*, 2023; Nogueira Neto *et al.*, 2024). Uma possível pressão de seleção causada por herbicidas pode comprometer a diversidade florística da Caatinga e Cerrado brasileiro, provocando danos incalculáveis às funções vitais e ecológicas desses biomas (Cabral *et al.*, 2023).

Estudos elucidando o impacto da contaminação do 2,4-D por diferentes vias de transporte em espécies florestais tornam-se importantes na medida em que podem fornecer informações sobre o potencial desse herbicida como agente de seleção. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar a contaminação por duas vias de transporte do herbicida 2,4-D em espécies florestais pertencentes aos biomas da Caatinga e do Cerrado Brasileiro.

REFERÊNCIAS

- BARROSO, G. M.; SANTOS, E. A.; PIRES, F. R.; GALON, L.; CABRAL, C. M.; SANTOS, J. B. Phytoremediation: A green and low-cost technology to remediate herbicides in the environment. **Chemosphere**, v. 334, e. 138943, 2023.
- BENAVIDES-PIRACÓN, J. A.; HERNÁNDEZ-BONILLA, D.; MENEZES-FILHO, J. A.; JOODE, B. V. W.; LOZADA, Y. A. V.; BAHIA, T. C.; CORTES, M. A. Q.; ACHURY, N. J. M.; MUÑOZ, I. A. M.; PARDO, M. A. H. Prenatal and postnatal exposure to pesticides and school-age children's cognitive ability in rural Bogotá, Colombia. **Neurotoxicology**, v. 90, p. 112-120, 2022.
- BORGES, M. P. S.; SILVA, D. V.; SOUZA, M. F.; SILVA, T. S.; TEÓFILO, T. M. S. SILVA, C. C.; PAVÃO, Q. S.; PASSOS, A. B. R. J.; SANTOS, J. B. Glyphosate effects on tree species natives from Cerrado and Caatinga Brazilian biome: Assessing sensitivity to two ways of contamination. **Science of the Total Environment**, v. 769, e. 144113, 2021.
- BRAUNS, B.; JAKOBSEN, R.; SONG, X.; BJERG, P. L. Pesticide use in the wheat-maize double cropping systems of the North China Plain: Assessment, field study, and implications. **Science of the Total Environment**, v. 617, p. 1307-1316, 2018.
- BROCHADO, M. G. S.; MIELKE, K. C.; PAULA, D. F.; LAUBE, A. F. S.; DE LA CRUZ, R. A.; GONZATTO, M. P.; MENDES, K. F. Impacts of dicamba and 2,4-D drift on "Ponkan" mandarin seedlings, soil microbiota and *Amaranthus retroflexus*. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 6, e. 100084, 2022.
- BUTOVA, V. V.; BAUER, T. V.; POLYAKOV, V. A.; RAJPUT, V. D.; MINKINA, T. M. Analyzing the benefits and limitations of advanced 2,4-D herbicide delivery systems. **Crop Protection**, v. 184, e. 106865, 2024.
- CABRAL, C. M.; SOUZA, M. F.; ALENCAR, B. T. B.; FERREIRA, E. A.; SILVA, D. V.; REGINALDO, L. T. R. T.; SANTOS, J. B. Sensibility, multiple tolerance and degradation capacity of forest species to sequential contamination of herbicides in groundwaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 448, e. 130914, 2023.
- DAS, K. T.; BEHERA, B.; NATH, C. P.; GHOSH, S.; SEN, S.; RAJ, R.; GHOSH, S.; SHARMA, A. R.; YADURAJU, N. T.; NALIA, A.; DUTTA, A.; KUMAR, N.; SINGH, R.; PATHAK, H.; SINGH, R. G.; HAZRA, K. K.; GHOSH, P. K.; LAYEK, J.; PATRA, A.;

- PARAMANIK, B. Herbicides use in crop production: An analysis of cost-benefit, non-target toxicities and environmental risks. **Crop Protection**, v. 181, e. 106691, 2024.
- DURÃES, N.; NOVO, L. A. B.; CANDEIAS, C.; DA SILVA, E. F. Distribution, transport and fate of pollutants. **Soil Pollution**, p. 29-57, 2018.
- FREITAS, J. S.; GITOTTO, L.; GOULART, B. C.; ALHO, L. O. G.; GEBARA, R. C.; MONTAGNER, C. C.; SCHIESARI, L.; ESPÍNDOLA, E. L. G. Effects of 2,4-D -based herbicide (DMA[®] 806) on sensitivity, respiration rates, energy reserves and behavior of tadpoles. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 182, e. 109446, 2019.
- GOULART, B. V.; VIZIOLI, B. C.; ESPINDOLA, E. L. G.; MONTAGNER, C. C. Matrix effect challenges to quantify 2,4-D and fipronil in aquatic systems. **Environmetal Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 797, p. 1-12, 2020.
- HOEK. A C.; MALELPOUR, S.; RAVEN, R.; COURT, E.; EMILY, B. Towards environmentally sustainable food systems: decision-making factors in sustainable food production and consumption. **Sustainable Production and Consumption**, v. 26, p. 610-626, 2021.
- HUANG, X.; FENG, C.; QIN, J.; WANG, X.; ZHANG, T. Measuring China's agricultural green total factor productivity and its drivers during 1998-2019. **Science of the Total Environment**, v. 829, e. 154477, 2022.
- IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente, 2023. Relatórios de comercialização de agrotóxicos. **Os 10 ingredientes ativos mais vendidos – 2023 – consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme o art. 41 do decreto nº 4074/2002**. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/relatorios-de-comercializacao-de-agrotoxicos>. Acesso em: 07 jul. 2025.
- ISLAM, F.; WANG, J.; FAROOQ, M. A.; KHAN, M. S. S.; XU, L.; ZHU, J.; ZHAO, M.; MUÑOS, S.; LI. X. Q.; ZHOU, W. Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. **Environment International**, v. 111, p. 332-351, 2018.
- KAUR, R. CHOUDHARY, D.; BALI, S.; BANDRAL, S. S.; SINGH, V.; AHMAD, M. A.; SINGH, T. G.; CHANDRASEKARAN, B. Pesticides: An alarming detrimental to health and environment. **Science of The Total Environment**, v. 915, e. 170113, 2024.
- KELLEY, K. B. & REICHERS, D. E. Recent developments in auxin biology and new opportunities for auxinic herbicide research. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 89, n.1, p.1-11, 2007.
- KUMAR, N.; NATH, C. P.; HAZRA, K. K.; PRAHARAJ, C. S.; SINGH. S. S.; SINGH, N. P. Long-term impact of zero-til residue management in post-rainy seasons after puddled rice and cropping intensification on weed seedbank, above-ground weed flora and crop productivity. **Ecological Engineering**, v. 176, e. 106540, 2022.
- KUMAR, V e KUMAR, P. Pesticides in agriculture and environment: Impacts on human health. In: **Contaminants in Agriculture and Environment: Health Risks and Remediation**. Agriculture and Environmental Science Academy, Haridwar, India, cap. 7, p.77-91, 2019.

KUSUMAVATHI, K.; RAUTARAY, S. K.; SARKAR, S.; DASH, S.; SAHOO, T. R.; SWAIN, S. K.; SETHI, D. Nano-herbicides a sustainable strategy for weed control. **Plant Nano Biology**, v. 11, e. 100132, 2025.

LAHNSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C. DALLA-NORA, E. L. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 58, n. 6, p. 4-15, 2016.

LI, Y.; YOU, K.; SUN, X.; CHEN, J. Dynamic assessment and pathway optimization of agricultural modernization in China under their sustainability framework: An empirical study based on dynamic QCA analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 479, n. 10, e. 144072, 2024.

MAPA. 2024. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Agrofit – consulta de ingredientes ativos.** Disponível em: https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 13 dez. 2024.

MARCATO, A. C. C.; SOUZA, C. P.; FONTANELLI, C. S. Herbicide 2,4-D: a review of toxicity on non-target organisms. **Water, Air & Soil Pollution**, v. 228, n. 3, p. 1-12, 2017.

NOGUEIRA NETO, F. A.; SOUZA, M. F.; BLAT, N. R.; SILVA, F. D.; FERNANDES, B. C. C.; CHAGAS, P. S. F.; ARAUJO, P. C. D.; LINS, H. A.; SILVA, D. V. Sensitivity and antioxidante response of forest species seedlings to the atrazine under simulated conditions of subsurface water contamination. **Chemosphere**, v. 360, e. 142411, 2024

PANDEY, D. K. & MISHRA, R. Towards sustainable agriculture: Harnessing AI for global food security. **Artificial Intelligence in Agriculture**, v. 12, p. 72-84, 2024.

PÉREZ-LUCAS, G.; GAMBÍN, M.; NAVARRO, S. Leaching behaviour appraisal of eight persistent herbicides on a loam soil amended with different composted organic wastes using screening indices. **Journal of Environmental Management**, v. 273, 3. 111179, 2020.

PETERSON, M. A.; McMASTER, S. A.; RIECHERS, D. E.; SKELTON, J.; STAHLMAN, P. W. 2,4-D Past, Present, and Future: A Review. **Weed Technology**, v. 30, p. 303-345, 2016.

PINTO, A.; AZENHA, M.; FIDALGO, F.; TEIXEIRA, J. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid detoxification occurs primarily in tomato leaves by the glutathione D-transferase phi members 4 and 5. **Scientia Horticulturae**, v. 321, e. 112214, 2023.

RUUSKANEN, S.; FUCHS, B.; NISSINEN, R.; PUIGBÓ, P.; RAINIO, M.; SAIKKONEN, K.; HELANDER, M. Ecosystem consequences of herbicides: the role of microbiome. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 38, n.1, p. 35-43, 2023.

SEAPDR – Secretaria da Agricultura, Pecuária e Desenvolvimento Rural. **Levantamento constata deriva de 2,4-D em 87,13% das amostras na safra atual.** Disponível em: <https://www.agricultura.rs.gov.br/levantamento-constata-deriva-de-2-4-d-em-87-amostras-na-safra-atual>. Acesso em 20 fev. 2025.

SWARTJES, F. A. & VANDER Aa, M. Measures to reduce pesticides leaching into groundwater-based drinking water resources: An appeal to national and local governments, water boards and farmers. **Science of The Total Environment**, v. 699, e. 134186, 2020.

VIANA, C. M.; FREIRE, D.; ABRANTES, P.; ROCHA, J.; PEREIRA, P. Agricultural land systems importance for supporting food security and sustainable development goals: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 806, n. 3, e. 150718, 2022.

YORLANO, M. F.; DEMÉTRIO, P. M. RIMOLDI, F. Riparian strips as attenuation zones for the toxicity of pesticides in agricultural surface runoff: Relative influence of herbaceous vegetation and terrain slope on toxicity attenuation of 2,4-D. **Science of the environment**, v. 807, e. 150655, 2022.

ZUANAZZI, N. R.; GHISI, N. C.; OLIVEIRA, E. C. Analysis of global trends and gaps for studies about 2,4-D herbicide toxicity: A scientometric review. **Chemosphere**, v. 241, e.125016, 2020.

ARTIGO 1: SIMULAÇÃO DO IMPACTO EM ESPÉCIES FLORESTAIS DA CONTAMINAÇÃO EM ÁGUA SUBSUPERFICIAL PELO 2,4-D

RESUMO

A contaminação de águas subterrâneas por herbicidas representa um risco para a diversidade de espécies florestais em áreas com lençol freático raso. O uso de tecnologias como milho, algodão e soja tolerantes ao herbicida 2,4-D tem intensificado o uso desse herbicida no Brasil, principalmente nas regiões onde a expansão de fronteiras agrícolas ocorre com mais intensidade, como na Caatinga e Cerrado brasileiro, levantando preocupações ambientais sobretudo em relação à contaminação de lençóis freáticos. Nesse sentido, este trabalho avaliou os efeitos da contaminação de 2,4-D em águas subterrâneas sobre espécies florestais presentes dos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiros. O experimento foi realizado em casa de vegetação, em delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram arranjos em esquema fatorial 10×2 , sendo o primeiro correspondente às espécies florestais: *Astronium urundeuva* (Allemão) Engl.), *Ceiba glaziovii* (Kuntze) K. Schum., *Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos, *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tual.) L. P. Queiroz, *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Duck, *Mimosa tenuiflora* (Mart.) Benth., *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong e *Parkinsonia aculeata* (J. Parkinson). O segundo fator consistiu da ausência ou presença do herbicida 2,4-D. Cada unidade experimental foi constituída de uma coluna contendo solo e um suporte inferior, onde era fornecida a água contaminada ou não com o herbicida, de acordo com a evapotranspiração das espécies florestais. A contaminação da água subterrânea com o herbicida 2,4-D afetou negativamente o número de folhas das espécies *M. tenuiflora* e *T. aurea*. No entanto, parâmetros morfológicos como a altura da planta, área foliar, massa seca da folha, caule, raiz e total não sofreram interferência quando expostas à contaminação de 2,4-D. O consumo e o uso eficiente da água não foram afetados quando as espécies foram expostas à água com a presença do herbicida 2,4-D. Foram encontrados resíduos de 2,4-D no solo de todas espécies florestais, sendo verificada a maior concentração residual associada à espécie *A. urundeuva*. A contaminação de água subterrânea por 2,4-D não afetou negativamente os parâmetros morfológicos das espécies avaliadas, com exceção do número de folha das espécies *M. tenuiflora* e *T. aurea*. Portanto, o herbicida 2,4-D pode atuar como agente selecionador de espécies presentes nesses biomas. Portanto, a maioria das espécies avaliadas apresenta tolerância à contaminação de 2,4-D em água subterrânea, entretanto pesquisas avaliando o impacto dessa contaminação em sementes dessas espécies são fundamentais para a compreensão dos impactos provocados desde o estabelecimento inicial dessas plantas.

Palavras-chave: Biodiversidade. Caatinga. Herbicidas. Impacto ambiental.

PAPER 1: SIMULATION OF THE IMPACT ON FOREST SPECIES OF 2,4-D CONTAMINATION IN SUBSURFACE WATER

ABSTRACT

Groundwater contamination by herbicides poses a risk to the diversity of forest species in areas with shallow water tables. The use of technologies such as 2,4-D tolerant corn, cotton, and soybeans has intensified the use of this herbicide in Brazil, particularly in regions where agricultural frontiers are expanding more intensively, such as the Brazilian Caatinga and Cerrado biomes. This study evaluated the effects of 2,4-D contamination in groundwater on forest species in the Brazilian Caatinga and Cerrado biomes. The experiment was conducted in a greenhouse, using a randomized complete block design with four replicates. The treatments were arranged in a 10×2 factorial scheme, where the first treatment corresponded to the forest species: *Astronium urundeuva* (Allemão) Engl.), *Ceiba glaziovii* (Kuntze) K. Schum., and *Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore, *Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos, *Libidibia ferrea* (Mart. Ex Tual.) L. P. Queiroz, *Piptadenia stipulacea* (Benth.) Duck, *Mimosa tenuiflora* (Mart.) Benth., *Mimosa caesalpiniiifolia* Benth., *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong, and *Parkinsonia aculeata* (J. Parkinson). The second factor consisted of the absence or presence of the herbicide 2,4-D. Each experimental unit consisted of a column containing soil and a lower support where water contaminated or not with the herbicide was supplied, according to the evapotranspiration of the forest species. Contamination of groundwater with the herbicide 2,4-D negatively affected the number of leaves of the species *M. tenuiflora* and *T. aurea*. However, morphological parameters such as plant height, area Leaf, leaf, stem, root, and total dry mass were not affected when exposed to 2,4-D contamination. Water consumption and efficient use were not affected when the species were exposed to water containing 2,4-D herbicide. 2,4-D residues were found in the soil of all forest species, with the highest residual concentration associated with *A. urundeuva*. Groundwater contamination by 2,4-D did not negatively affect the morphological parameters of the evaluated species, with the exception of leaf number in *M. tenuiflora* and *T. aurea*. Therefore, the herbicide 2,4-D may act as a selection agent for species present in these biomes. Therefore, most of the evaluated species are tolerant to 2,4-D contamination in groundwater. However, research evaluating the impact of this contamination on the seeds of these species is essential to understanding the impacts caused since the initial establishment of these plants.

Keywords: Biodiversity. Caatinga. Herbicides. Environmental impact.

INTRODUÇÃO

Os pesticidas são produtos utilizados na agricultura para o manejo das pragas nocivas à produtividade e qualidade dos produtos agrícolas. No entanto, seu uso intensivo e incorreto tem causado dispersão desses compostos e de seus metabólitos no meio ambiente, especialmente no solo e na água, provocando danos ambientais incalculáveis (Mierzejewska e Urbaniak, 2022). A contaminação dos recursos naturais e os impactos negativos dos pesticidas têm sido relatados por inúmeros estudos, principalmente em países com intensa atividade agrícola (Lupi *et al.*, 2019; Fernandes *et al.*, 2019; Kumar *et al.*, 2022; Cabral *et al.*, 2023).

A contaminação por pesticidas em corpos hídricos por processos de transporte, como escoamento superficial e/ou lixiviação, tem sido frequentemente relatada (Prado *et al.*, 2016; Bianchi *et al.*, 2017; Lozano *et al.*, 2019; Pérez-Lucas *et al.*, 2020). A contaminação dos corpos hídricos em decorrência desses processos pode comprometer o abastecimento de água para a população, produção animal e cultivos agrícolas (Nogueira Neto *et al.*, 2024).

O herbicida 2,4-D é amplamente utilizado em áreas agrícolas em todo o mundo para o controle de plantas daninhas de folhas largas (Carles *et al.*, 2021). O 2,4-D é considerado um potencial poluidor de água subterrânea (Islam *et al.*, 2018), devido ao baixo coeficiente de adsorção e alta solubilidade, o herbicida 2,4-D é considerado potencial agente poluidor ambiental (Brauns *et al.*, 2018; Islam *et al.*, 2018; Musznski, Brodowska e Pasko, 2020).

O 2,4-D é um dos herbicidas mais utilizados no Brasil (Ibama, 2023), podendo o uso excessivo provocar contaminação de águas superficiais e subterrâneas em locais próximos a áreas agrícolas (Freitas *et al.*, 2024). De acordo com os relatórios de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo, Brasil, em ambientes aquáticos próximos a áreas com predominância de cultivo de cana-de-açúcar foi identificado 2,4-D em concentrações variando de 175,1 a 366,6 µg/L (Cetesb, 2018). A Resolução CONAMA nº 396 estabelece os seguintes valores máximos permitidos para o 2,4-D: 100 µg/l em águas de recreação e 30 µg/l em água potável (Brasil, 2008).

O risco de contaminação de água subterrânea por herbicidas aumenta para áreas de matas ciliares próximas a áreas agrícolas, podendo comprometer o estabelecimento de espécies florestais sensíveis devido à absorção de água contaminada em lençóis freáticos rasos (Fiore *et al.*, 2019; Cabral *et al.*, 2023). Para espécies arbóreas presentes em áreas da Caatinga e do Cerrado e em zonas de transição desses biomas pode ser ainda mais intenso devido à expansão da agricultura nessas áreas (Borges *et al.*, 2021). O potencial produtivo nas regiões Nordeste e Centro-Oeste do Brasil nos últimos anos tem impulsionado a expansão de novas áreas agrícolas

para o plantio de soja, milho e cana-de-açúcar, com cultivares resistentes ao herbicida 2,4-D, permitindo o uso dessa molécula em áreas agrícolas dessas regiões (Lahsen *et al.*, 2016; Freitas *et al.*, 2024). O uso intensivo desse herbicida alerta para a necessidade de compreender o impacto do 2,4-D na diversidade de espécies arbóreas presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado Brasileiro (Cabral *et al.*, 2023).

Estudos anteriores relataram que a presença de herbicidas em água subterrânea pode atuar como agente de seleção de espécies arbóreas presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado Brasileiro (Borges *et al.*, 2021; Cabral *et al.*, 2023; Nogueira Neto *et al.*, 2024). De acordo com Cabral *et al.* (2023), a contaminação de 2,4-D em água subterrânea afetou negativamente parâmetros morfológicos de espécies florestais do bioma Cerrado, podendo o herbicida atuar como agente selecionador de espécies desse bioma, comprometendo a biodiversidade florística.

Todavia, os resultados demonstraram que as propriedades físico-químicas dos herbicidas e a sua interação no solo influenciam diretamente no potencial de impacto ambiental. Por exemplo, o *glyphosate* apresenta maior capacidade de sorção em solos e, portanto, o risco de seleção via contaminação de lençóis freáticos rasos é minimizado (Okada, Costa e Bedmar, 2016; Graziano *et al.*, 2023). Entretanto, herbicidas com menor coeficiente de sorção em solos, como o 2,4-D pode apresentar maior capacidade de contaminar plantas via absorção radicular (Marcatto *et al.*, 2017; Islam *et al.*, 2018; Martins *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2021; Diagboya e During, 2024).

O 2,4-D atua como regulador de crescimento vegetal, ligando-se a receptores de auxina nas células vegetais, desencadeando a divisão e alongamento celular excessivos, e em elevadas concentrações resulta em deformações nas folhas, caules e raízes (Cabral *et al.*, 2023). Esse herbicida apresenta alta solubilidade em água e baixa sorção no solo, por ser predominantemente um ânion (Islam *et al.*, 2018) e geralmente ânions são fracamente sorvidos ou repelidos pelas superfícies do solo (Islam *et al.*, 2018), em solos da Caatinga e do Cerrado onde predominam solos com cargas negativas e baixo teor de matéria orgânica (Cabral *et al.*, 2023). Essa combinação de fatores favorece a lixiviação, tornando o 2,4-D potencial poluidor de águas subterrâneas (Fiore *et al.*, 2019). Entretanto, estudos avaliando o impacto causado por 2,4-D em lençol freático são escassos (Cabral *et al.*, 2023).

Portanto, o conhecimento da sensibilidade de espécies nativas da Caatinga e do Cerrado ao herbicida 2,4-D informará sobre seu potencial como agente de seleção. O presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos da exposição ao 2,4-D via água subterrânea em espécies florestais presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiro.

MATERIAL E MÉTODOS

Condições experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), Campus Leste, no município de Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram arranjos em fatorial 10×2 , sendo o primeiro fator correspondente às espécies florestais e o segundo à ausência (controle) ou presença do herbicida 2,4-D (Aminol 806[®], ADAMA) em água.

As espécies florestais estudadas compreendem dois biomas brasileiros, a Caatinga e o Cerrado. As mudas selecionadas foram: Aroeira (*Astronium urundeuva* (Allemão) Engl.), Barriguda (*Ceiba glaziovii* (Kuntze) K.Schum), Craibeira (*Tabebuia aurea* (Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore), Ipê-Roxo (*Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos), Jucá (*Libidibia ferrea* (Mart. Ex Tual.) L. P. Queiroz), Jurema Branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth.) Ducke), Jurema Preta (*Mimosa tenuiflora* (Mart.) Benth), Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth), Timbaúba (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong) e Turco (*Parkinsonia aculeata* (J. Parkinson)). As mudas foram adquiridas de um viveiro comercial (Viveiro Oeste soluções ambientais) localizado na cidade de Mossoró-RN, Brasil.

A unidade experimental correspondeu a uma planta de cada espécie, cultivada em coluna de policloreto de vinila (PVC), com 35 cm de altura e 100 mm de diâmetro. Na parte inferior das colunas, foram colocadas tampas de PVC com furos em espaçamentos equidistantes para permitir a entrada de água por capilaridade. Entre a coluna e a tampa, foi colocada uma camada com lã de vidro para evitar perda de solo. Cada coluna foi preenchida com peso de 3,5 kg de solo e acondicionada em recipiente com capacidade volumétrica de 500 mL. O recipiente por meio do qual a água foi fornecida era recoberto por adesivo de cor branca para evitar a fotodegradação do 2,4-D. Após adição da água, o recipiente era fechado com uma tampa recoberta por adesivo branco. A água necessária para o crescimento das plantas foi fornecida por capilaridade, simulando um lençol freático.

O substrato utilizado nas unidades experimentais foi constituído de solo e material orgânico (proporção 10:1). O solo utilizado foi coletado a uma camada de 0 a 20 cm em uma área sem histórico de aplicação de herbicida, próximo à horta didática do Departamento de Ciência Agrárias e Florestais (DCAF) da UFERSA. Uma amostra de solo (500 g) foi coletada,

seca ao ar e peneirada com malha de 2 mm de abertura para a caracterização química e física (Tabela 1) de acordo com a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 1. Caracterização química e física dos atributos do solo.

Prof. (cm)	pH (água)	CE	COT	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(H+Al)	T	Areia	Silte	Argila
		dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	----- cmol dm ⁻³ -----						----- g kg ⁻¹ -----		
0-20	7,00	0,21	11,21	0,68	0,09	3,10	2,00	0,00	5,87	880	70	50

Fonte: O autor (2025). **Nota:** **prof.:** profundidade; **pH:** potencial hidrogeniônico; **CE:** condutividade elétrica; **COT:** Carbono orgânico total; **K⁺:** íon potássio; **Na⁺:** íon sódio; **Ca²⁺:** íon cálcio; **Mg²⁺:** íon magnésio; **H+Al:** acidez potencial; **T:** capacidade de troca catiônica.

As mudas foram transplantadas para as colunas de PVC e aclimatadas por 30 dias. Após esse período, as espécies florestais foram cultivadas por 40 dias recebendo água com e sem adição de 2,4-D. A água foi disponibilizada às plantas exclusivamente por capilaridade. A água contaminada pelo herbicida foi na concentração de 100 µg/l. O volume de água era fornecido de acordo com a evapotranspiração das espécies florestais. O volume de água utilizado foi registrado para a obtenção do volume de evapotranspiração de água (L) para cada espécie avaliada. A eficiência no uso da água (E.U.A) foi calculada como a razão entre a massa seca total e a evapotranspiração medida após a aplicação de 2,4-D até o final do experimento (g/L). A evapotranspiração foi determinada como a soma do volume total de água adicionado.

A composição química da água utilizada durante a aclimação das mudas e condução do ensaio foi caracterizada (Tabela 2) e fornecida para o crescimento das mudas florestais, de acordo com a evapotranspiração de cada espécie, simulando a absorção de água pelas raízes a partir do lençol freático.

Tabela 2. Caracterização química da água.

pH (água)	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ³⁻	RAS	Dureza
	dS m ⁻¹					----- mmol L ⁻¹ -----				mg L ⁻¹
8,00	0,61	0,06	1,35	0,70	3,00	2,80	0,60	3,60	1,0	185

Fonte: O autor (2025). **Nota:** **pH:** Potencial hidrogeniônico; **CE:** condutividade elétrica; **K⁺:** íon potássio; **Na⁺:** íon sódio; **Ca²⁺:** íon cálcio; **Mg²⁺:** íon magnésio; **Cl⁻:** íon cloro; **CO₃²⁻:** íon carbonato; **HCO₃³⁻:** íon bicarbonato; **RAS:** relação de adsorção de sódio.

Avaliação de crescimento das espécies

Aos 40 dias de condução do experimento, foram avaliados os seguintes parâmetros morfológicos: altura da planta, número de folhas, área foliar, massa seca da folha, do caule, da

raiz e a total. A altura da planta foi medida da base do solo até o ápice foliar, com auxílio de uma fita métrica, expresso em centímetros. A área foliar foi obtida a partir de registros fotográficos (Souza *et al.*, 2012), analisadas com o *software* ImageJ (*National Institute of Health*, NY, EUA), com os resultados expressos em cm². A massa seca da folha, do caule, da raiz e a total foram obtidas quando o material foi acondicionado em sacos de papel, levados a estufa de circulação forçada de ar com temperatura constante de 65 °C durante 72 h. As amostras foram pesadas em balança analítica, e os resultados foram expressos em grama (g).

O solo que recebeu água contendo o herbicida foi retirado da coluna ao fim do experimento, homogeneizado e seco ao ar; posteriormente, uma amostra com aproximadamente 300 g foi acondicionada em sacos plásticos e armazenada em refrigerador (-18°C) para posterior análise da concentração residual do herbicida 2,4-D.

Extração de 2,4-D do solo e condições cromatográficas

A extração do herbicida nas amostras de solo foi realizada pelo método QuEChERS de acordo com Pang *et al.* (2016), com algumas adaptações. Foram pesados 5 g do solo em tubo Falcon de 50 mL; em seguida, foram adicionados 10 mL de acetonitrila, 100 µL de ácido acético e 2 mL de água destilada. Os tubos foram agitados (12 rpm) verticalmente por 15 minutos, em agitador tipo Wagner. Posteriormente, as amostras foram submetidas a um banho ultrassônico por 20 minutos. Em seguida, foi adicionado a cada tubo Falcon 1 g de NaCl e 2 g de MgSO₄. A mistura foi agitada em vórtex (1 min) e centrifugada 2260 g por cinco minutos. Uma alíquota do sobrenadante foi retirado e filtrado em filtro de *nylon* de 0,22 µm e colocado em *vials* para análise por cromatografia líquida de ultraperformance acoplada ao espectrômetro de massas (LC-MS/MS).

A quantificação do 2,4-D presente no solo das espécies florestais foi realizada em um cromatógrafo líquido de ultraperformance (UHPLC), conectado ao Espectrômetro de Massas (LC-MS/MS). O UHPLC Nexera X2 (Shimadzu, Tóqui, Japão) é equipado com duas bombas LC – 30AD, um desgaseificador DGU – 20*5R, um auto-*sampler* Sil – 30AC, um forno de coluna CTO-30AC e um controlador CBM – 20A. A separação ocorreu em uma coluna Restek (Pinnacle DB AQ C18 de tamanho 50 × 2,1 mm, com partículas de 1,9 µm), com fluxo de 0,15 mL min⁻¹ com eluição isocrática contendo 70% da bomba B, volume de injeção de 5 µL e as temperaturas do amostrador e do forno da coluna foram de 15 e 40 °C, respectivamente. As fases móveis foram: A (água ultrapura com 0,1% de ácido fórmico) e B (acetonitrila grau HPLC).

Análises estatísticas

Os dados foram analisados separadamente para cada espécie, comparando os tratamentos com e sem aplicação do herbicida por meio do teste t de Student, ao nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$). Para variáveis como a eficiência no uso da água (E.U.A) e o consumo total de água entre as espécies dentro de cada condição (controle e herbicida), foram feitas com o teste de Tukey ($p \leq 0,05$), após verificação da normalidade dos resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk. As análises estatísticas foram realizadas no *software* R (versão 2023.06.1+524), com uso dos pacotes *expdes.pt* e *ggplot2*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Crescimento das espécies

O número de folhas sofreu impacto negativo quando exposta à contaminação de água subterrânea com 2,4-D, nas espécies florestais *M. tenuiflora* e *T. aurea* (Tabela 3). As espécies remanescentes não tiveram diferença para o parâmetro avaliado. A senescência foliar observada nessas espécies devido à exposição de 2,4-D sugere a ação deste herbicida como um sinalizador do processo de morte foliar. O aumento da concentração de auxina nas folhas pode estimular a produção de etileno, que desencadeia a senescência foliar (Cabral *et al.*, 2023).

Tabela 3. Número de folhas, altura e área foliar de mudas de espécies nativas dos biomas da Caatinga e do Cerrado submetidas à contaminação de 2,4-D em água subterrânea.

Espécie	Número de folhas		Altura (cm)		Área foliar (cm ²)	
	Controle	2,4-D	Controle	2,4-D	Controle	2,4-D
<i>A. urundeuva</i>	17 a	15 a	45,88 a	45,13 a	840,67 a	830,30 a
<i>C. glaziovii</i>	14 a	14 a	55,13 a	52,35 a	1235,97 a	1070,45 a
<i>E. contortisiliquum</i>	15 a	13 a	62,63 a	67,10 a	1091,56 a	1227,56 a
<i>H. impetiginosus</i>	15 a	15 a	23,30 a	23,13 a	997,72 a	752,73 a
<i>L. ferrea</i>	24 a	25 a	95,88 a	101,38 a	894,32 a	896,97 a
<i>M. caesalpiniifolia</i>	12 a	15 a	61,25 a	70,13 a	1183,03 a	1091,56 a
<i>M. tenuiflora</i>	37 a	23 b	84,25 a	81,50 a	368,73 a	302,13 a
<i>P. stipulacea</i>	23 a	17 a	108,50 a	114,13 a	338,92 a	290,48 a
<i>P. aculeata</i>	13 a	13 a	90,00 a	81,00 a	1228 a	902 a
<i>T. aurea</i>	23 a	17 b	34,25 a	32,50 a	674,99 a	603,33 a
CV (%)	34,55		15,74		35,74	

Fonte: O autor (2025). *Diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$). Todos os dados são apresentados como média. CV= Coeficiente de variação.

Moléculas de 2,4-D, quando absorvidas pelas raízes, podem alcançar as folhas seguindo o fluxo transpiratório (Teófilo *et al.*, 2020). Dessa forma, reduções da parte aérea podem ocorrer em plantas onde as moléculas do herbicida se acumulam, reduzindo o número de folhas (Teófilo *et al.*, 2020). Essa perda de folhas é prejudicial ao crescimento da planta devido à menor produção de fotoassimilados, consequentemente o menor número de folhas pode ter reduzido a quantidade de 2,4-D absorvido pelas raízes via transpiração, permitindo menor dano a essas espécies (Cabral *et al.*, 2023).

A clorose foliar observada nessas plantas sugere desregulação fisiológica ocasionada pela contaminação por 2,4-D, incluindo a produção de etileno e o estresse oxidativo (Yorlano *et al.*, 2022). Esse estresse pode ter ocasionado intensa perda de folha nas espécies *M. tenuiflora* e *T. aurea*, com reduções de 37,8% e 26,1% do número de folhas, respectivamente.

A altura das plantas expostas ao 2,4-D não sofreu impacto negativo quando comparada ao controle. Ainda que o crescimento em altura das plantas não tenha sofrido impacto negativo da contaminação de 2,4-D por água subterrânea, estudos anteriores relataram efeito negativo em parâmetros morfológicos das plantas, como a altura e o diâmetro de caule quando exposto ao 2,4-D (Cabral *et al.*, 2023).

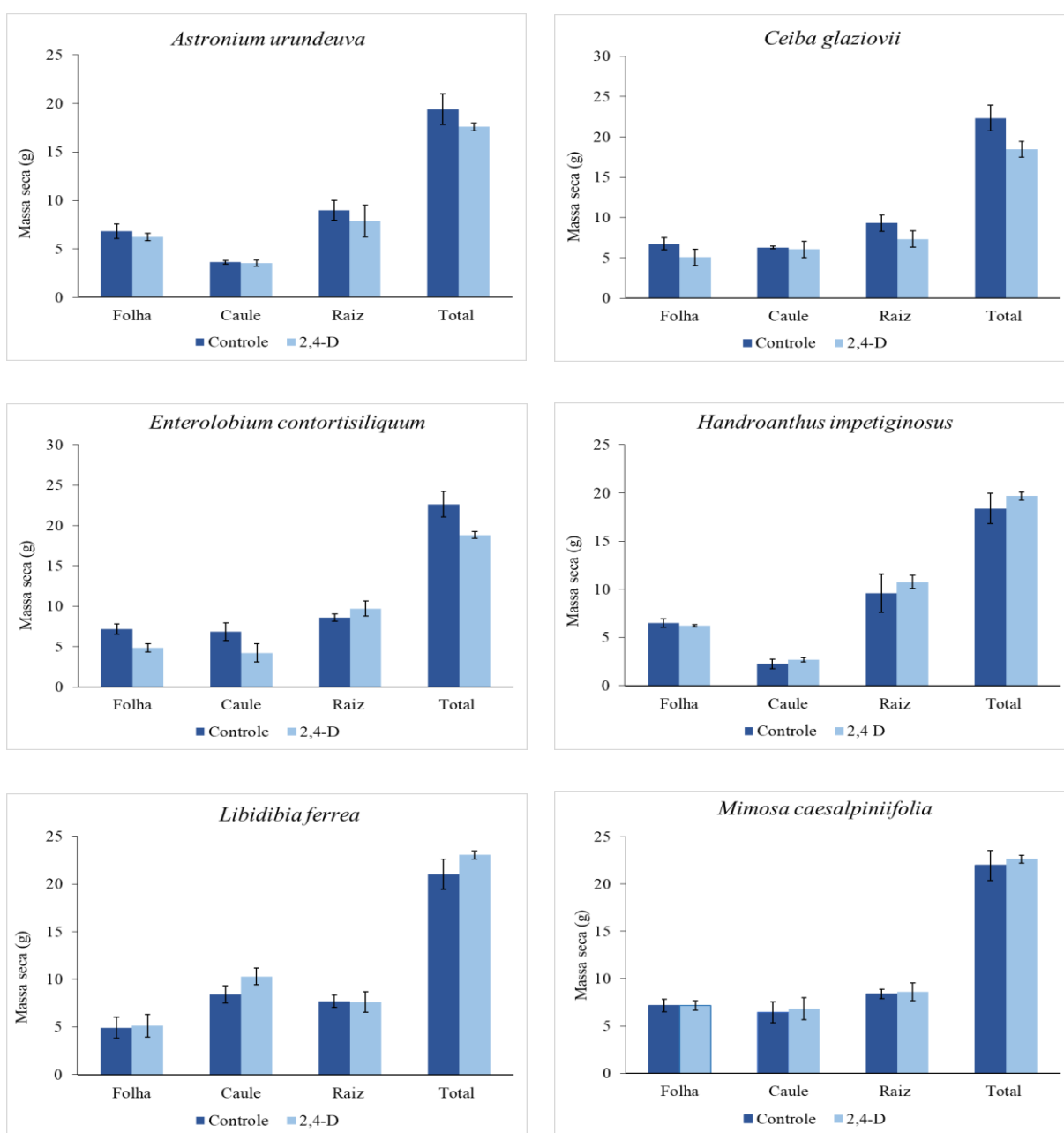
As espécies florestais podem metabolizar herbicidas auxínicos em diferentes partes das plantas, o que se deve às concentrações naturais de auxinas presentes nos tecidos (Cabral *et al.*, 2023), portanto o efeito verificado em uma parte da planta pode não ser observado em outra, o que provavelmente acontece nas espécies arbóreas presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado. Além disso, a quantidade de 2,4-D que pode ter chegado ao caule deve ter sido metabolizada em diferentes partes das plantas como a raiz (Islam *et al.*, 2018; Pinto *et al.*, 2023).

A área foliar das espécies não sofreu redução quando houve exposição ao 2,4-D, mesmo em espécies que tiveram seu número de folhas reduzidos (*M. tenuiflora* e *T. aurea*) (Tabela 3). A espécie *M. tenuiflora* é relatada possuindo adaptação foliar ou sincronismo fenológico quando em estresse. A modulação dos tecidos foliares e dos componentes da parede celular conferiu importantes alterações de defesa contra o ataque de insetos formadores de galhas (Nogueira *et al.*, 2022). A reorganização do tecido foliar, alteração na produção de pectina e compartimentação foram relatados por esses autores como mecanismos de defesa contra o estresse, levando a espécie a sentir menos efeitos como o estresse hídrico (Nogueira *et al.*, 2022).

Em relação a *Tabebuia aurea*, é escassa a literatura sobre adaptações foliares da espécie. Informações indiretas como a ocorrência inédita de ácidos graxos poliinsaturados, como ácido octadecatetraenóico (Mahmoud *et al.*, 2021), podem estar relacionadas à manutenção da área

foliar e acúmulo de massa, mesmo em situação de perda inicial de folhas, como em resposta ao 2,4-D em nossa pesquisa.

O acúmulo de biomassa seca das folhas, do caule, da raiz e a total não foi alterado pela contaminação simulada de 2,4-D em água subterrânea (Figura 1). Esses resultados sugerem que a toxicidade do herbicida depende não apenas da sua concentração, como também de sua biodisponibilidade (Islam *et al.*, 2018). A provável presença de microrganismos no solo pode ter favorecido a degradação do herbicida e, conseqüentemente, atenuado o efeito da contaminação por 2,4-D (Lipthay *et al.*, 2003).



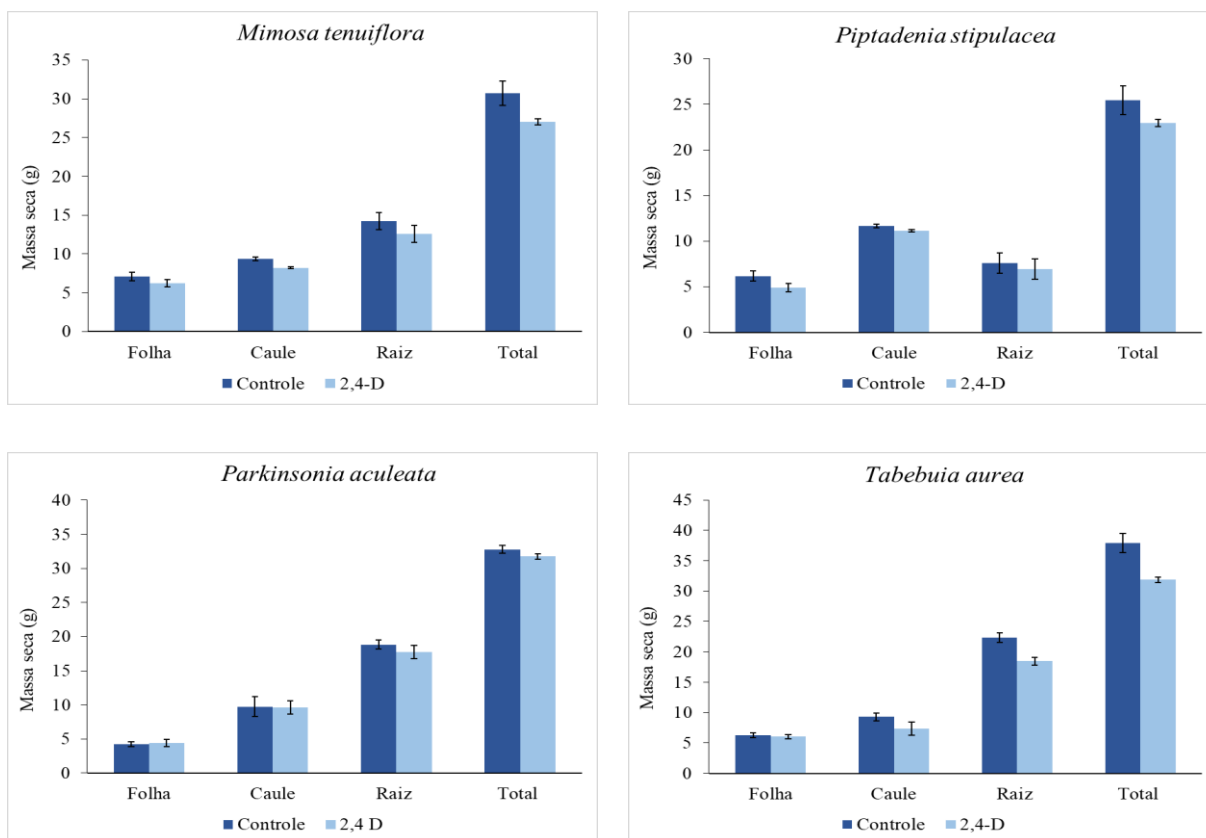


Figura 1. Massa seca da folha, caule, raiz e total de espécies florestais presentes nos biomas da Caatinga e Cerrado brasileiro. Fonte: O autor (2025).

Além disso, outra hipótese que corrobora os resultados de biomassa seca é que essas espécies arbóreas apresentam capacidade de recuperar rapidamente sua biomassa em condições de estresse com a água contaminada por herbicida (Cabral *et al.*, 2023). Espécies pertencentes ao cerrado como a *I. vera* e a *T. guianensis* aumentaram a biomassa de raízes e folhas após a exposição à contaminação de 2,4-D e atrazina em água subsuperficial (Cabral *et al.*, 2023).

A biomassa seca é essencial na avaliação da sensibilidade a herbicidas e na seleção de possíveis espécies com potencial fitorremediador (Teófilo *et al.*, 2020; Carles *et al.*, 2021). Os resultados sugerem que as espécies florestais apresentaram tolerância à contaminação de água subterrânea a 2,4-D. Esse achado é relevante porque essas espécies podem ser sugeridas para programas de reflorestamento desses biomas em áreas contaminadas por 2,4-D.

É importante destacar que, dependendo da formulação, o comportamento do herbicida é diferente no meio aquático. A formulação de 2,4-D com sal dimetilamida do ácido 2,4-D apresenta solubilidade em água superior ao ácido 2,4-D, portanto a concentração do herbicida na formulação com sal dimetilamida fica presente na fase aquosa, chegando até águas subterrâneas, entretanto podem ficar mais disponíveis a processos de degradação biológica,

precipitação com sais e adsorção aos sedimentos da água (Yorlano *et al.*, 2022). Na maioria das condições ambientais, os sais de amina retornam para 2,4-D (Marcato *et al.*, 2017).

Outro fato que merece destaque é que o 2,4-D apresenta meia-vida curta em água, aproximadamente 40 dias (Samarghandi *et al.*, 2018). Estudo sobre a contaminação de 2,4-D em espécies arbóreas do bioma do Cerrado brasileiro observou ausência completa do herbicida no solo ao fim do experimento (Cabral *et al.*, 2023), evidenciando meia-vida curta e a disponibilidade para diferentes rotas de degradação.

Consumo de água

As espécies florestais apresentaram diferenças no que diz respeito ao consumo de água. As espécies *M. tenuiflora*, *P. Stipulacea* e *E. contortisiliquum* apresentaram o maior consumo de água entre as espécies, 8,5, 7,4 e 6,2 L, respectivamente. As espécies *H. impetiginosus*, *C. glaziovii* e *A. urundeuva* apresentaram o menor consumo de água entre as espécies, 3,3, 3,8 e 4,0 L (Figura 2).

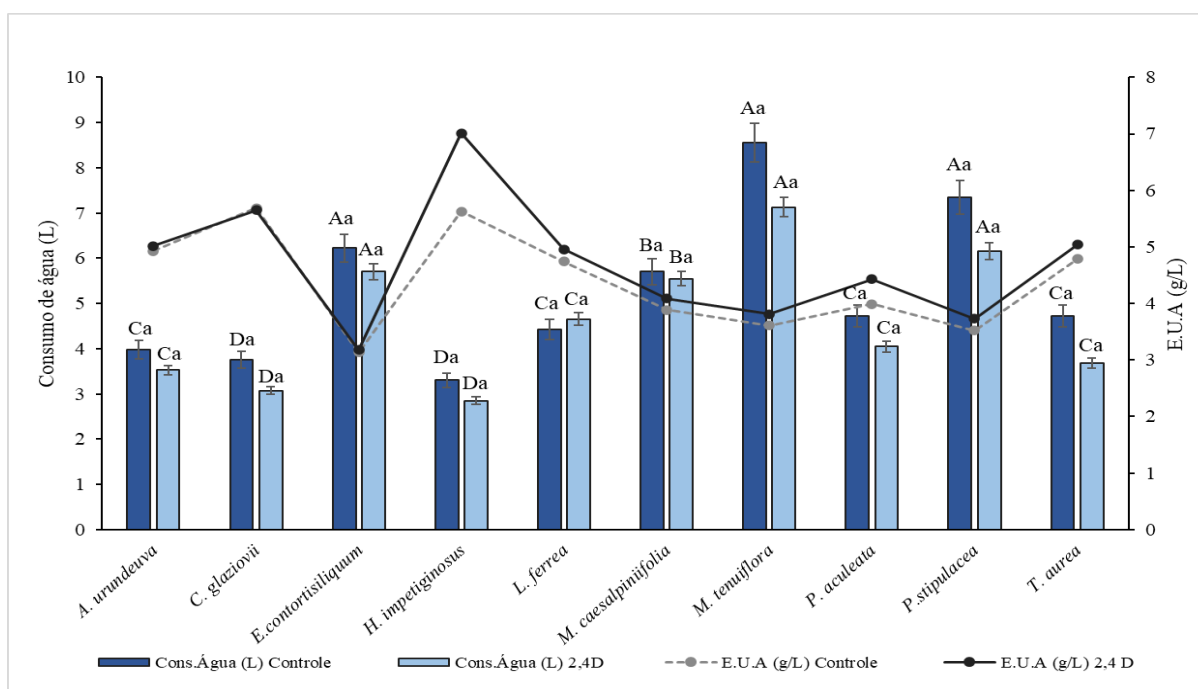


Figura 2. Consumo de água (L) e eficiência no uso da água (E.U.A., g/L) de diferentes espécies sob duas condições: controle e presença de herbicida 2,4-D. Fonte: O autor (2025). As barras representam o consumo de água, ao passo que as linhas representam a eficiência no uso da água. Letras maiúsculas comparam as espécies dentro de cada condição e letras minúsculas comparam os tratamentos (controle vs. 2,4-D) dentro de cada espécie, conforme o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para as médias entre espécies e teste t de Student ($p \leq 0,05$) para comparação entre controle e 2,4-D.

A presença do herbicida em água subterrânea não afetou o consumo de água pelas espécies. Esse achado é oposto ao relatado na literatura para a contaminação de herbicidas como

o glifosato e atrazina, onde reduções do consumo da água, eficiência no uso da água e evapotranspiração são relatadas para espécies florestais pertencentes a esses biomas (Borges *et al.*, 2021; Nogueira Neto *et al.*, 2024). Os herbicidas podem alterar a taxa de transpiração de plantas sensíveis e tolerantes, modificando a condutância estomática e, consequentemente, as trocas gasosas entre a atmosfera e o mesofilo foliar através dos estômatos (Nogueira Neto *et al.*, 2024).

Com exceção da espécie *H. impetiginosus*, a contaminação por 2,4-D não afetou a eficiência no uso da água em mudas de espécies florestais da Caatinga e do Cerrado brasileiro. O aumento da eficiência no uso da água observado na espécie *H. impetiginosus* pode sugerir o estabelecimento dessa espécie em relação às outras. Espécies mais eficientes no uso da água, quando expostas à contaminação por herbicidas, podem se estabelecer e favorecer o aumento populacional mais facilmente do que as espécies sensíveis a essa contaminação de herbicidas por água subterrânea contaminada (Cabral *et al.*, 2023).

A quantidade de herbicida adicionada por espécie variou de acordo com a evapotranspiração das plantas, portanto espécies que consumiram mais água foram expostas a maiores quantidades de 2,4-D. As espécies florestais contaminadas com as maiores massas de 2,4-D foram *M. tenuiflora*, *P. stipulacea*, *E. contortisiliquum*, 712,5, 615 e 570 μg , respectivamente. As menores doses foram registradas para *H. impetiginosus* (285 $\mu\text{g/L}$), *C. glaziovii* (307,5 μg) e *A. urundeuva* (367,5 μg) (Figura 3).

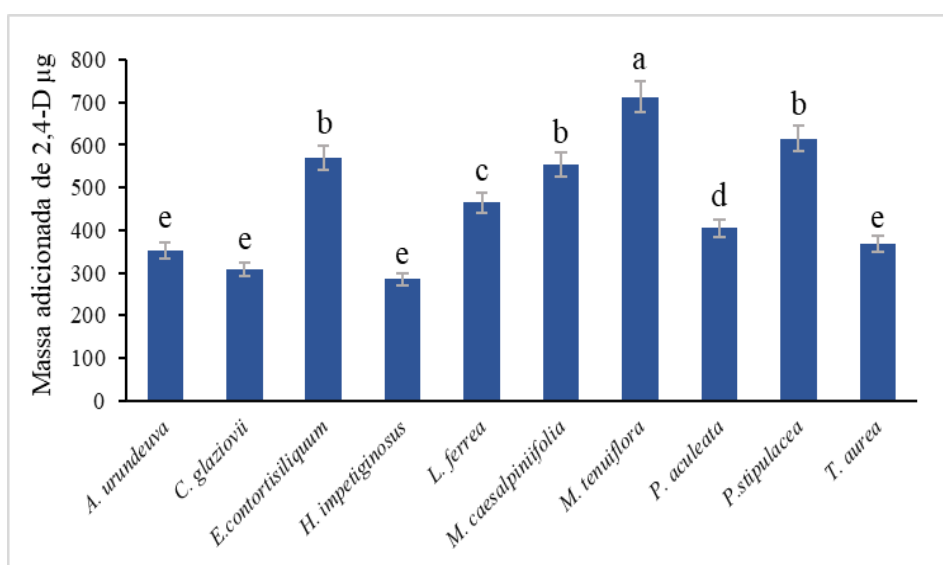


Figura 3. Estimativa da massa adicionada de 2,4-D em espécies florestais. Fonte: O autor (2025).

Apesar de cada espécie ser exposta a uma concentração diferente de 2,4-D devido ao processo de evapotranspiração, o consumo e a eficiência no uso da água não apresentaram

redução na comparação ao controle (Figura 2 e 3). Inácio *et al.* (2016) observaram que subdoses de 2,4-D podem não afetar significativamente a eficiência no uso da água de algumas culturas.

Nossos resultados levantam questões relevantes sobre o impacto da contaminação de águas subterrâneas em espécies arbóreas pertencentes a Caatinga e Cerrado brasileiro. As plantas não sofreram alterações na relação hídrica quando expostas ao herbicida. Esse fato sugere que as espécies florestais podem apresentar mecanismos de tolerância.

Quando submetidas ao estresse por contaminação de herbicida em água subterrânea, espécies florestais podem utilizar mecanismos de compensação fisiológica, como fechamento estomático parcial, aumento da fotossíntese ou alterações no acúmulo de biomassa que podem ter mantido a eficiência hídrica (Borges *et al.*, 2021). Essa resiliência pode ser atribuída a mecanismos fisiológicos de compensação, como ajustes na abertura estomática, de modo a permitir que as plantas mantenham a eficiência hídrica sob estresse químico.

Bioacumulação e dissipação do 2,4-D

O resíduo de 2,4-D foi analisado para todos os solos cultivados com as espécies florestais. A espécie *M. tenuiflora* apresentou o menor valor médio de concentração residual (2,00 µg/kg) do herbicida e apresentou o maior percentual de degradação entre as espécies (99,03%) (Figura 4 e 5).

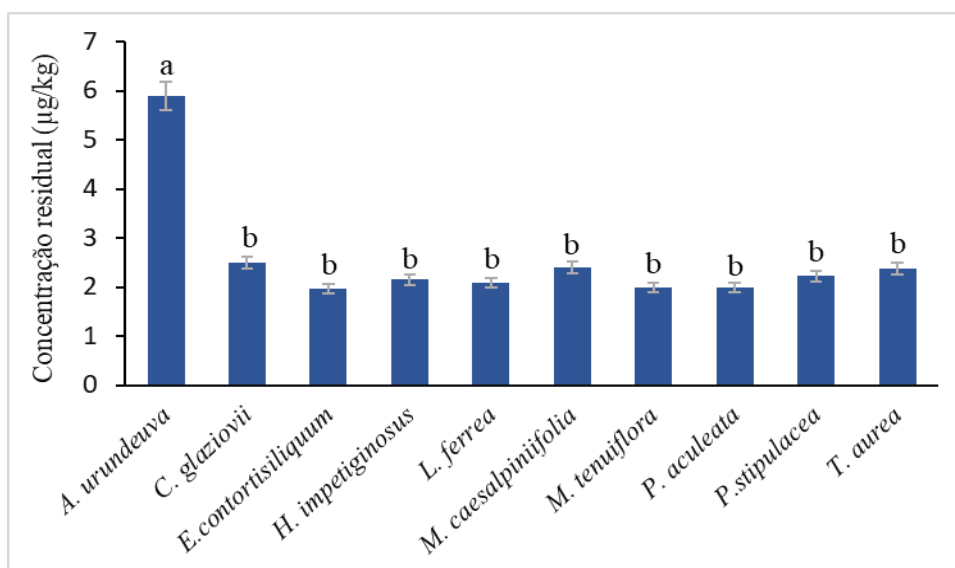


Figura 4. Concentração residual de 2,4-D no solo. Fonte: O autor (2025).

A espécie *A. urundeuva* apresentou maior concentração residual (5,90 µg/kg) de herbicida e o menor valor percentual de dissipação (94,10%) de 2,4-D. A disponibilidade do

herbicida 2,4-D verificada nesse estudo pode estar relacionada à interação entre diversos parâmetros edáficos, como teor de umidade do solo, pH, temperatura, teor de matéria orgânica, cátions e ânions e a dose do herbicida disponível em solução (Carles *et al.*, 2021).

As espécies com menores concentrações no solo foram a *A. urundeuva*, *C. glaziovii*, *H. impetiginosus* e *T. aurea*. As espécies avaliadas apresentaram dissipação (%) do herbicida 2,4-D maior do que 90 %. A espécie que menos dissipou foi *A. urundeuva* (Figura 5).

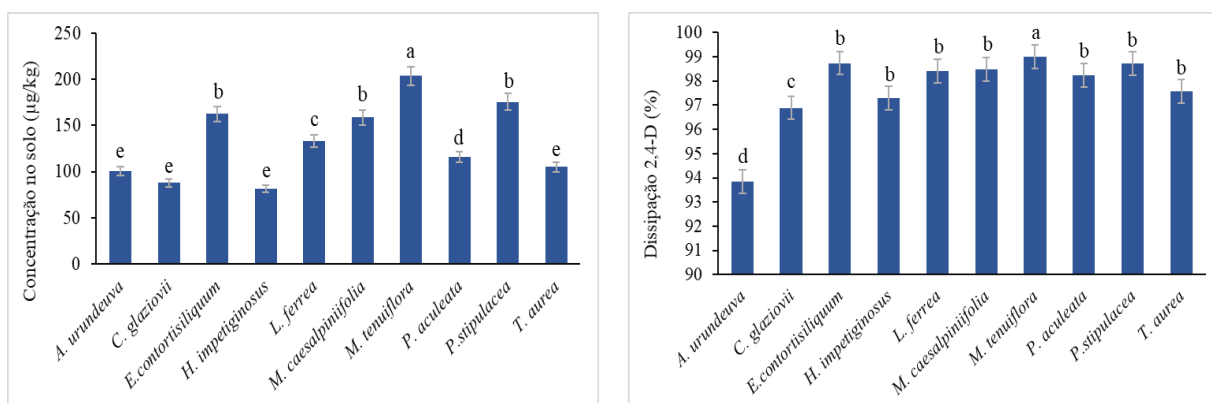


Figura 5. Estimativa da concentração no solo e dissipação do 2,4-D. Fonte: O autor (2025).

No solo, a molécula de 2,4-D pode ser degradada por diversos microrganismos que podem mineralizar o herbicida e reduzir em até três vezes sua persistência no solo (Carles *et al.*, 2021), auxiliando, assim, as espécies a sobreviverem ao estresse pela contaminação de 2,4-D em águas subterrâneas, devido a baixas concentrações.

Os principais processos que influenciam o destino dos herbicidas no solo são a adsorção, degradação e o transporte (Pérez-Lucas *et al.*, 2020). A adsorção limita o movimento dos herbicidas no solo devido aos teores de argila e matéria orgânica e a faixa de pH do solo (Pérez-Lucas *et al.*, 2020). No presente estudo, não foi possível determinar o grau de participação de cada processo de degradação de 2,4-D no solo.

Além de processos de degradação de 2,4-D no solo, as moléculas desse herbicida podem ser degradadas na água. A degradação de moléculas do herbicida 2,4-D em água ocorre também pelo processo de hidrólise (Islam *et al.*, 2018). Para os herbicidas pertencentes ao grupo fenoxiácidos, a hidrólise é a principal reação química que inicia a degradação de ésteres em água. Os principais fatores que determinam a taxa de hidrólise são a estrutura do herbicida, pH e temperatura da água. Em condições de água alcalina e temperatura elevada, a velocidade de degradação dos herbicidas por hidrólise aumenta (Romero *et al.*, 2015).

É possível que a presença do herbicida 2,4-D no solo (Figura 4) decorra de mecanismos de tolerância dessas espécies, como a exsudação radicular. Para o 2,4-D, a taxa de absorção aumenta rapidamente logo após a aplicação e depois decresce até se tornar nula, passando, em seguida, para negativa, ou seja, a planta elimina moléculas do 2,4-D por exsudação radicular (Peterson *et al.*, 2016; Nault *et al.*, 2018).

A massa seca da folha, caule, raiz e total das espécies arbóreas nativas da Caatinga e Cerrado brasileiro não foram afetadas pela exposição à contaminação de águas subterrâneas ao herbicida 2,4-D. Esses resultados podem sugerir que concentrações de até 100 µg/l, limite permitido em água de recreação de acordo com a legislação ambiental brasileira (BRASIL, 2008), pode não representar risco de perda da diversidade da flora nos biomas da Caatinga e do Cerrado por água subterrânea contaminada por 2,4-D.

Além disso, é possível que diversos processos de degradação biológica e química atuem em águas subterrâneas, como também é possível que a presença de sais, como carbonatos e bicarbonatos, precipite a molécula do 2,4-D, atenuando, desse modo, o efeito herbicida nas espécies florestais. Trabalhos futuros devem avaliar o impacto dessa concentração do herbicida na germinação de sementes dessas espécies. Pela idade das mudas e, conseqüentemente, teor de lignificação, pouco se esperava do efeito tóxico, contudo, durante o processo de germinação e emergência ou mesmo em instantes iniciais da plântula, a relação água/matéria seca-lignina é superior, o que provavelmente aumenta o efeito tóxico do herbicida, dada a maior taxa relativa de produção celular.

CONCLUSÕES

Os achados deste estudo demonstram que a presença do herbicida 2,4-D em água subterrânea não afetou negativamente os parâmetros morfológicos das espécies, com exceção do número de folhas nas espécies *Mimosa tenuiflora* e *Tabebuia aurea*. O consumo e a eficiência no uso da água pelas espécies não foram alterados quando as espécies foram expostas à contaminação de 2,4-D. Recomenda-se a realização de estudos complementares, visando a elucidar processos fisiológicos e bioquímicos que podem conferir tolerância às espécies. Estudos futuros devem ser direcionados ao uso dessas espécies na recuperação de áreas contaminadas com 2,4-D.

REFERÊNCIAS

BIANCHI, E.; LESSING, G.; BRINA, K. R.; ANGELI, L.; ANDRIGUETTI, N. B.; PERUZZO, J. R. S.; NASCIMENTO, C. A.; SPILKI, F. R.; ZIULKOSKI, A. L.; SILVA, L. B. Monitoring the Genotoxic and Cytotoxic Potential and the Presence of Pesticides and Hydrocarbons in Water of the Sinos River Basin, Southern Brazil. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 72, p. 321-334, 2017.

BORGES, M. P. S.; SILVA, D. V.; SOUZA, M. F.; SILVA, T. S.; TEÓFILO, T. M. S. SILVA, C. C.; PAVÃO, Q. S.; PASSOS, A. B. R. J.; SANTOS, J. B. Glyphosate effects on tree species natives from Cerrado and Caatinga Brazilian biome: Assessing sensitivity to two ways of contamination. **Science of the Total Environment**, v. 769, e. 144113, 2021.

BRASIL. **Decreto nº 396, de 3 de abril de 2008**. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, DF, nº 66, páginas 64-68, seção 1, 2008.

BRAUNS, B.; JAKOBSEN, R.; SONG, X.; BJERG, P. L. Pesticide use in the wheat-maize double cropping systems of the North China Plain: Assessment, field study, and implications. **Science of The Total Environment**, v. 617, p. 1307-1316, 2018.

CABRAL, C. M.; SOUZA, M. F.; ALENCAR, B. T. B.; FERREIRA, E. A.; SILVA, D. V.; REGINALDO, L. T. R. T.; SANTOS, J. B. Sensibility, multiple tolerance and degradation capacity of forest species to sequential contamination of herbicides in groundwaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 448, e. 130914, 2023.

CARLES, L.; MARTIN-LAURENT, F.; DEVERS, M.; SPOR, A.; ROUARD, N.; BEGUET, J.; BESSE-HOGGAN, P.; BATISSON, I. Potential of preventive bioremediation to reduce environmental contamination by pesticides in an agricultural context: A case study with the herbicide 2,4-D. **Journal of Hazardous Materials**, v. 416, e. 125740, 2021.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Qualidade das Águas interiores no Estado de São Paulo. Relatórios, Séries Relatórios/CETESB, São Paulo. 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

DA SILVA TEÓFILO, T. S.; MENDES, K. F.; FERNANDES, B. C. C.; OLIVEIRA, F. S.; SILVA, T. S.; TAKESHITA, V.; SOUZA, M. F.; TORNISIELO, V. L.; SILVA, D. V. Phytoextraction of diuron, hexazonone, and sulfometuron-methyl from the soil by green manure species. **Chemosphere**, v. 256, 3. 127059, 2020.

DIAGBOYA, P. N.; DURING, R. A. Assessing global-warming induced soil organic matter and iron oxides depletion: Empirical insights into sorption and uptake of atrazine by plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 283, e. 116794, 2024.

FERNANDES, G.; APARICIO, V. C.; BASTOS, M. C.; GERÓNIMO, E.; LOBANOWSKI, J.; PRESTES, O. D.; ZANELLA, R.; SANTOS, D. R. Indiscriminate use of glyphosate impregnates river epilithic biofilms in southern Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 651, n. 1, p. 1377-1387, 2019.

IORE, R. A.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, E. A.; CABRAL, C. M.; LAIA, M.; SILVA, D. V.; SOUZA, M. F. Selection of arboreal species to compose and remedy riparian forests next to agricultural areas. **Ecological Engineering**, v. 131, p. 9-15, 2019.

FREITAS, I. B. F.; DUARTE-NETO, P. J.; SORIGOTTO, L. R.; YOSHII, M. P. C.; LOPES, L. F. P.; PEREIRA, M. M. A.; GIROTTO, L.; ATHAYDE, D. B.; GOULART, B. V.; MONTAGNER, C. C.; SCHIESARI, L. C.; MARTINELLI, L. A.; ESPÍNDOLA, E. L. G. Effects of pasture intensification and sugarcane cultivation on non-target species: A realistic evaluation in pesticide-contaminated mesocosms. **Science of the Total Environment**, v. 922, e. 171425, 2024.

GRAZIANO, M.; PORFIRI, C.; TUFO, A. E.; MONTOYA, J. C.; AFONSO, M. S. Reversibility of glyphosate sorption in pampean loess-derived soil profiles of central Argentina. **Chemosphere**, v. 312, n. 1, e. 137143, 2023.

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente, 2023. Relatórios de comercialização de agrotóxicos. **Os 10 ingredientes ativos mais vendidos – 2023 – consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme o art. 41 do decreto nº 4074/2002**. Disponível em: Relatórios de comercialização de agrotóxicos — Ibama (www.gov.br). Acesso em: 07 jul. 2025.

INÁCIO, E. M. **Efeito de subdoses do herbicida 2,4-D na cultura do milho: crescimento, metabolismo e produtividade**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-30092016-105412/pt-br.php>. Acesso em: 12 abr. 2025.

ISLAM, F.; WANG, J.; FAROOQ, M. A.; KHAN, M. S. S.; XU, L.; ZHU, J.; ZHAO, M.; MUÑOS, S.; LI, X. Q.; ZHOU, W. Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. **Environment International**, v. 111, p. 332-351, 2018.

KUMAR, N.; NATH, C. P.; HAZRA, K. K.; PRAHARAJ, C. S.; SINGH, S. S.; SINGH, N. P. Long-term impact of zero-til residue management in post-rainy seasons after puddled rice and cropping intensification on weed seedbank, above-ground weed flora and crop productivity. **Ecological Engineering**, v. 176, e. 106540, 2022.

LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DALLA-NORA, E. L. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 58, n. 6, p. 04-15, 2016.

LIPTHAY, J. R.; TUXEN, N.; JOHSEN, K.; HANSEN, L. H.; ALBRECHTSEN, H. J.; BJERG, P. L.; AAMAND, J. In Situ Exposure to Low Herbicide Concentrations Affects Microbial Population Composition and Catabolic Gene Frequency in an Aerobic Shallow Aquifer. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 69, n. 1, p. 461-467, 2003.

LOZANO, V. L.; MIRANDA, C. E.; VINOCUR, A. L.; GONZÁLEZ, C.; UNREIN, F.; WOLANSKY, M. J.; PIZARRO, H. N. Turbidity matters: differential effect of a 2,4-D formulation on the structure of microbial communities from clear and turbid freshwater systems. **Heliyon**, v. 5, e. 02221, 2019.

LUPI, L.; BEDMAR, F.; PURICELLI, M.; MARINA, D.; APARICIO, V. C.; WUNDERLIN, D.; MIGLIORANZA, K. S. B.; Glyphosate runoff and its occurrence in rainwater and subsurface soil in the nearby area of agricultural fields in Argentina. **Chemosphere**, v. 225, p. 906-914, 2019.

- MAHMOUD, B. K.; HAMED, A. N. E.; SAMY, M. N.; ABDELMOHSEN, U. R.; ATTIA, E.Z.; RAFAEY, R. H.; SALEM, M. A.; PIMENTEL-ELARDO, S. M.; NODWELL, J.R.; DESOUKEY, S. Y.; KAMEL, M. S. Metabolomic profiling and biological investigation of *Tabebuia Aurea* (Silva Manso) leaves, family Bignoniaceae. **Natural Product Research**, v. 35, p. 4632-4637, 2021.
- MARCATO, A. C. C.; SOUZA, C. P.; FONTANETTI, C. S. Herbicide 2,4-D: A review of Toxicity on Non-Target Organisms. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 120, p. 1-12, 2017.
- MARTINS, E. C.; MELO, V. F.; BOHONE, J. B.; ABATE, G. Sorption and desorption of atrazine on soil: The effect of different soil fractions. **Geoderma**, v. 322, p.131-139, 2018.
- MIERZEJEWSKA, E. & URBANIAK, M. Phenony Herbicides in Aquatic Ecosystems: Environmental levels, Toxicological Effects, and Remediation Methods. In: CHAKRABORTY, P.; SNOW, D. (org.). **Legacy and Emerging Contaminants in Water and Wastewater**. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies, 2022. p. 361-388.
- MUSZYNSKI, P.; BRODOWSKA, M. S.; PASZKI, T. Occurrence and transformation of phenony acids in aquatic environment and photochemical methods of their removal: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 1276-1293, 2020.
- NAULT, M. E.; BARTON, M.; HAUXWELL.; HEATH, E.; HOYMAN, T.; MIKULYUK, A.; NETHERLAND, M. D.; PROVOST, S.; SKOGERBOE, J.; EGEREN, S. V. Evaluation of large-scale low-concentration 2,4-D treatments for Eurasian and hybrid watermilfoil control across multiple Wisconsin lakes. **Lake and Reservoir Management**, v. 34, n. 2, p. 115-129, 2018.
- NOGUEIRA NETO, F. A.; SOUZA, M. F.; BLAT, N. R.; SILVA, F. D.; FERNANDES, B. C. C.; CHAGAS, P. S. F.; ARAUJO, P. C. D.; LINS, H. A.; SILVA, D. V. Sensitivity and antioxidante response of forest species seedlings to the atrazine under simulated conditions of subsurface water contamination. **Chermosphere**, v. 360, e. 142411, 2024.
- NOGUEIRA, R. M.; COSTA, E. C.; SILVA, J. S.; ISAIAS, R. M. S. A phenological trick and cell wall bricks toward adaptive strategies of *Mimosa tenuiflora*-*Lopesia mimosae* interaction in Caatinga environment. **Flora**, v. 294, e. 152121, 2022.
- OKADA, E.; COSTA, J.L.; BEDMAR, F. Adsorption and mobility of glyphosate in different soils under no-till and conventional tillage. **Geoderma**, v. 236, n. 1, p. 78-85, 2016.
- PETERSON, M. A.; McMASTER, S. A.; REICHERS, D. E.; SKELTON, J. STAHLMAN, P. W. 2,4-D Past, Present, and Future: A Review. **Weed Tecnology**, v. 30, p. 303-354, 2016.
- PRADO, B.; STROZZI, A. G.; HERTA, E.; DUWING, C.; ZAMORA, O.; DELMAS, P.; CASASOLA, D.; MÁRQUEZ, J. 2.4-D Mobility in clay soils: Impact of macrofauna abundance on soil porosity. **Geoderma**, v. 279, p. 87-96, 2016.
- PÉREZ-LUCAS, G.; GAMBÍN, M.; NAVARRO, S. Leaching behaviour appraisal of eight persistent herbicides on a loam soil amended with different composted organic wastes using screening indices. **Journal of Environmental Management**, v. 273, e. 111179, 2020.

PINTO, A.; AZENHA, M.; FIDALGO, F.; TEIXEIRA, J. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid detoxification occurs primarily in tomato leaves by the glutathione S-transferase phi members 4 and 5. **Scientia Horticulturae**, v. 321, e. 112214, 2023.

ROMERO, J. M.; JORGE, N. L.; GRAND, A.; HERNÁNDEZ-LAGUNA, A. Hydrolysis reaction of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. A kinetic and computational study. **Chemical Physics Letters**, v. 639, p. 57-62, 2015.

SAMARGHANDI, M. R.; NEMATOLLAHI, D.; ASGARI, G.; ANSARI, A.; DARGAHI, A. Electrochemical process for 2,4-D herbicide removal from aqueous solutions using stainless steel 316 and graphite Anodes: optimization using response surface methodology. **Separation Science and technology**, v. 54, n.4, p.478-493, 2018.

SBCPD – Sociedade Brasileira de Ciência das Plantas Daninhas, 1995. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina, p.42.

SOUZA, M. S.; ALVES, S. S. V.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, J. D. B.; AROUCHA, E. M. M. Comparação de métodos de mensuração de área foliar para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n.2, p. 241-245, 2012.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965.

SWARTJES, F. A. & VANDER Aa, M. Measures to reduce pesticides leaching into groundwater-based drinking water resources: An appeal to national and local governments, water boards and farmers. **Science of The Total Environment**, v. 699, e. 134186, 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANE, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

YORLANO, M. F.; DEMÉTRIO, P. M. RIMOLDI, F. Riparian strips as attenuation zones for the toxicity of pesticides in agricultural surface runoff: Relative influence of herbaceous vegetation and terrain slope on toxicity attenuation of 2,4-D. **Science of the environment**, v. 807, e. 150655, 2022.

ZHANG, Y.; YANG, C.; ZHENG, Z.; CAO, B.; YOU, G.; LIU, Y.; JIANG, Z. Mechanism for various phytotoxicity of atrazine in soils to soybean: Insights from soil sorption abilities and dissolved organic matter properties. **Journal of Environmental Management**, v. 297, e. 113220, 2021.

ARTIGO 2: HERBICIDA COMO FILTRO FLORÍSTICO: SIMULAÇÃO DOS EFEITOS DA DERIVA DE 2,4-D SOBRE ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA E DO CERRADO BRASILEIRO

RESUMO

Cultivos agrícolas localizados nas proximidades de áreas de vegetação nativa representam potencial risco à flora sensível, em razão do transporte de herbicida pelo vento. A magnitude dos efeitos varia entre as espécies, tendo em vista que herbicidas como o 2,4-D podem atuar como agentes seletivos, favorecendo espécies mais tolerantes ao longo do tempo. Nesse estudo, avaliamos os efeitos da deriva do herbicida 2,4-D sobre espécies florestais nativas presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiro, visando a obter informações sobre a sensibilidade diferencial entre espécies. O experimento de simulação de deriva foi conduzido em ambiente protegido, com dez espécies florestais nativas dos biomas da Caatinga e Cerrado submetidas a cinco doses do herbicida, correspondentes a 0, 5, 10, 15 e 20 % da dose recomendada. As espécies apresentaram sensibilidade quando expostas à deriva simulada de 2,4-D, e os principais sintomas de intoxicação foram senescência foliar, epinastia, clorose e necrose das folhas. A dose de 134 g.e.a.ha⁻¹ afetou negativamente os parâmetros morfológicos, como o número de folhas, altura, peso da massa seca de folhas, caule, raiz e total, com exceção do comprimento radicular. Os parâmetros morfológicos das plantas apresentaram sensibilidade diferencial quando expostas à deriva de 2,4-D. *Handroanthus impetiginosus*, *Ceiba glaziovii* foram as espécies mais sensíveis à deriva, com reduções de 59 % e 47 % da massa seca total, respectivamente. Os resultados sugerem que 2,4-D pode atuar como fator de seleção para espécies florestais nos biomas da Caatinga e Cerrado brasileiro, provocando erosão da diversidade florística desses biomas.

Palavras-chave: Herbicidas auxínicos. Transporte de herbicidas. Fitotoxicidade. Ecotoxicologia.

PAPER 2: SENSITIVITY OF FOREST SPECIES FROM THE CAATINGA AND CERRADO BIOMES SUBJECTED TO SIMULATED 2,4-D DRIFT

ABSTRACT

Agricultural crops located near native vegetation are a potential risk to sensitive flora due to herbicide transport by wind. The magnitude of the effects varies among species, and herbicides such as 2,4-D can act as selective agents, favoring more tolerant species over time. In this study, we evaluated the effects of 2,4-D herbicide drift on native forest species in the Brazilian Caatinga and Cerrado biomes, aiming to obtain information on differential sensitivity between species. The drift simulation experiment was conducted in a protected environment, with ten native forest species from the Caatinga and Cerrado biomes subjected to five doses of the herbicide, corresponding to 0, 5, 10, 15, and 20% of the recommended dose. The species showed sensitivity when exposed to simulated 2,4-D drift, and the main symptoms of toxicity were leaf senescence, epinasty, chlorosis, and leaf necrosis. The 134 g.e.a.ha⁻¹ dose negatively affected morphological parameters such as leaf number, height, leaf, stem, root, and total dry mass weights, with the exception of root length. Plant morphological parameters showed differential sensitivity when exposed to 2,4-D drift. *Handroanthus impetiginosus* and *Ceiba glaziovii* were the most sensitive species to drift, with reductions of 59% and 47% of total dry mass, respectively. The results suggest that 2,4-D may act as a selection factor for forest species in the Brazilian Caatinga and Cerrado biomes, causing erosion of their floristic diversity.

Keywords: Auxinic herbicides. Herbicide transport. Phytotoxicity. Ecotoxicology.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o avanço da agricultura tem sido marcado por significativas inovações tecnológicas, incluindo o desenvolvimento de culturas transgênicas resistentes a herbicidas hormonais, como o 2,4-D (Islam *et al.*, 2018). Tecnologias como soja, milho e algodão tolerantes ao 2,4-D têm sido amplamente adotadas no Brasil, permitindo sua aplicação em pós-emergência e ampliando o uso do herbicida em diversos sistemas produtivos. Além das culturas geneticamente modificadas, o 2,4-D é também empregado em áreas não agrícolas, como pastagens, pomares e na dessecação pré-semeadura, devido à sua elevada eficácia no controle de plantas daninhas de folhas largas (Egan *et al.*, 2014, Marcatto *et al.*, 2017; Cabral *et al.*, 2023).

Contudo, o uso intensivo desse herbicida em áreas próximas a ecossistemas naturais levanta preocupações ambientais, sobretudo em virtude da possibilidade de deriva durante a aplicação, podendo atingir espécies não alvo localizadas nas bordas de fragmentos florestais, afetando negativamente sua fisiologia, crescimento e, potencialmente, a composição florística local (Borges *et al.*, 2021; Nogueira Neto *et al.*, 2024). O 2,4-D é um herbicida sistêmico aplicado em pré e pós-emergência, cujo modo de ação envolve alterações hormonais nas plantas, como aumento da plasticidade da parede celular, produção anormal de etileno e proteínas, resultando em divisão celular descontrolada e danos aos tecidos vasculares (Butova *et al.*, 2024; Pinto *et al.*, 2023). No Brasil, os impactos da deriva já foram documentados para outros herbicidas (Borges *et al.*, 2021; Cabral *et al.*, 2023; Nogueira Neto *et al.*, 2024), mas ainda são escassas investigações focadas no 2,4-D e seus efeitos sobre espécies florestais.

O 2,4-D é o segundo herbicida mais utilizado no Brasil, ficando atrás do glifosato (IBAMA, 2023). Esse alto volume de aplicação reflete a expansão das fronteiras agrícolas em regiões sensíveis, como os biomas da Caatinga e do Cerrado, que juntos representam cerca de 33,8% do território nacional e são reconhecidos como *hotspots* mundiais de biodiversidade (Lahsen *et al.*, 2016; Borges *et al.*, 2021; Carvalho *et al.*, 2023). Espécies nativas desses biomas demonstram elevada sensibilidade à exposição por deriva, o que pode gerar pressão seletiva sobre a vegetação, favorecendo espécies tolerantes e comprometendo a diversidade florística (Borges *et al.*, 2021). A perda de biodiversidade nesses ecossistemas representa risco ecológico considerável, especialmente diante da escassez de estudos específicos sobre os efeitos da deriva de 2,4-D em espécies florestais nativas da Caatinga e do Cerrado.

Diante desse cenário, torna-se essencial compreender como espécies florestais nativas respondem à exposição não intencional a herbicidas hormonais, especialmente em regiões onde

a vegetação nativa coexiste com áreas de agricultura intensiva. A avaliação dos efeitos da deriva simulada do herbicida 2,4-D permite identificar níveis de sensibilidade entre diferentes espécies, contribuindo para o entendimento dos impactos potenciais sobre a estrutura e a diversidade florística desses biomas. Tais informações são fundamentais para subsidiar estratégias de manejo sustentável, definir zonas de amortecimento entre lavouras e áreas naturais, bem como embasar políticas públicas visando à conservação da biodiversidade em paisagens agrícolas. Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da deriva simulada em parâmetros morfológicos de espécies florestais pertencentes aos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiros.

MATERIAL E MÉTODOS

Condições Experimentais

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró, Rio Grande do Norte. O delineamento utilizado foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram arranjos em fatorial 5×10 . O primeiro fator corresponde às doses 0; 33,5; 67,0; 100,5 e 134 g.e.a.ha⁻¹ do herbicida 2,4-D (Aminol 806®, ADAMA), correspondentes à deriva de 5, 10, 15 e 20 % da dose comercial. O segundo fator correspondeu às espécies florestais.

As espécies florestais utilizadas foram Aroeira (*Astronium urundeuva* (Allemão) Engl.), Barriguda (*Ceiba glaziovii*), Craibeira (*Tabebuia aurea* (Manso) Benth. Hook. f. ex S. Moore), Ipê-Roxo (*Handroanthus impetiginosus* (Mart. Ex DC.) Mattos), Jucá (*Libidibia ferrea* (Mart. Ex Tual.) L. P. Queiroz), Jurema Branca (*Piptadenia stipulacea* (Benth) Ducke), Jurema Preta (*Mimosa tenuiflora* (Mart.) Benth), Sabiá (*Mimosa caesaliniifolia* Benth), Timbaúba (*Enterolobium contorsiliquum* (Vell.) Morong) e Turco (*Parkinsonia aculeata* (J. Parkinson)). As mudas foram adquiridas em viveiro comercial (Viveiro Oeste soluções ambientais), localizado no município de Mossoró-RN, Brasil.

O substrato utilizado nas unidades experimentais foi composto de solo e material orgânico (10:1). O solo utilizado como substrato foi coletado na profundidade de 0-20 cm em uma área sem histórico de aplicação de herbicida, localizada próximo à horta didática da UFERSA. Uma amostra homogênea de 500 g do substrato foi retirada, seca ao ar e peneirada em peneira com malha de 2 mm de abertura para a caracterização dos atributos químicos e físicos (Tabela 1), de acordo com a metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo.

Prof. (cm)	pH (água)	CE	COT	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	(H+Al)	T	Areia	Silte	Argila
		dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	cmol dm ⁻³						 g kg ⁻¹		
0-20	7,00	0,21	11,21	0,68	0,09	3,10	2,00	0,00	5,87	880	70	50

Fonte: O autor (2025). **Nota:** **prof.:** profundidade; **pH:** potencial hidrogeniônico; **CE:** condutividade elétrica; **COT:** Carbono orgânico total; **K⁺:** íon potássio; **Na⁺:** íon sódio; **Ca²⁺:** íon cálcio; **Mg²⁺:** íon magnésio; **H+Al:** acidez potencial; **T:** capacidade de troca catiônica.

A unidade experimental foi constituída por uma planta acondicionada em vaso de polietileno (citropote) com capacidade de 5 L. Após o transplântio, as mudas foram aclimatadas durante 30 dias. Posteriormente, simulou-se a deriva do herbicida 2,4-D, utilizando um pulverizador costal de pesquisa pressurizado com CO₂ (Herbicat® – Catanduva, SP, Brasil), acoplado a uma barra de pulverização com quatro pontas tipo plano Teejet XR 110.02, espaçados 50 cm, sob pressão equivalente a 2,6 kgf cm² externamente à casa de vegetação para evitar sobreposição de doses. Decorridas 24 h da simulação da deriva, as mudas foram transferidas de volta à casa de vegetação.

Avaliação da intoxicação visual

A fitotoxicidade do herbicida nas plantas foi avaliada aos 7, 14, 21, 28 e 35 dias após a aplicação (DAA) do 2,4-D. As unidades experimentais receberam notas de acordo com a observação dos sintomas, seguindo os seguintes critérios de fitotoxicidade: 0% (ausência de sintomas); 1-30% (leve clorose); 31-69% (clorose grave e necrose leve a moderada); 70-99% (clorose grave e necrose grave); e 100% (morte das plantas) (SBCPD, 1995).

Avaliação do crescimento da planta

Após 35 dias, foram avaliados os seguintes parâmetros morfológicos das espécies florestais: altura da planta, número de folhas, área foliar, comprimento de raiz, massa seca da folha, do caule, da raiz e a total. A medição da altura da planta foi realizada da base do solo até o ápice foliar com o auxílio de uma fita métrica. O comprimento de raiz foi realizado com o auxílio de uma fita métrica, após a remoção das raízes dos citropotes.

A área foliar foi determinada por meio de registros fotográficos, e as imagens foram processadas, com o auxílio do *software* ImageJ (National Institute of Health, New York, EUA), expressa em cm² (Souza *et al.*, 2012). Para a obtenção da massa seca das plantas, as partes das

plantas foram separadas em raiz, caule e folhas, acondicionadas em sacos de papel e posteriormente colocadas em estufa com circulação forçada de ar a uma temperatura constante de 65 °C por 72 horas, período após o qual o material foi pesado em balança analítica digital. Os valores de massa seca das plantas foram expressos em grama (g).

Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) em esquema fatorial, considerando o delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro e Wilk, 1965). Quando identificada diferença significativa pelo teste F ($p \leq 0,05$), as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Todas as análises foram realizadas no *software* R (versão 2023.06.1+524), utilizando os pacotes *expdes.pt* para a ANOVA e comparações de médias e *ggplot2* para a geração dos gráficos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A deriva simulada de 2,4-D em espécies florestais afetou o número de folhas das espécies *C. glaziovii*, *H. impetiginosus*, *M. tenuiflora*, *A. urundeuva*, *P. stipulacea*, *T. aurea* (Tabela 2). A espécie *A. urundeuva* apresentou sensibilidade à deriva do herbicida 2,4-D, com redução 47% do número de folhas de na dose de 134 g.e.a.ha⁻¹, correspondente a 20 % da deriva. Não foram observadas diferenças entre as doses aplicadas na espécie, sendo que a deriva de 5 % foi suficiente para impactar negativamente o número de folhas para essa espécie (Tabela 2).

Tabela 2. Número de folhas de espécies florestais dos biomas da Caatinga e Cerrado, submetidas à contaminação por deriva do herbicida 2,4-D.

Espécies	Doses do 2,4-D (g.e.a.ha ⁻¹)				
	0	33,5	67,0	100,5	134,0
<i>A. urundeuva</i>	17a	10b	13b	9b	9b
<i>C. glaziovii</i>	18a	15a	18a	11b	6b
<i>E. contortisiliquum</i>	12a	14a	15a	12a	14a
<i>H. impetiginosus</i>	12b	17a	10b	14b	9b
<i>L. férrea</i>	28a	25a	26a	24a	25a
<i>M. caesalpiniifolia</i>	11a	14a	13a	12a	13a

<i>M. tenuiflora</i>	33a	28a	33a	31a	25a
<i>P. stipulacea</i>	27a	14b	23a	18b	13b
<i>P. aculeata</i>	42a	53a	53a	52a	53a
<i>T. aurea</i>	21a	23a	25a	32a	18b
CV (%)	28,23				

Fonte: O autor (2025). Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos (P<0,05). CV=Coeficiente de variação.

A deriva de 2,4-D provocou abscisão foliar das plantas de *C. glaziovii* nas derivas de 15 e 20 %, entretanto, após os 35 dias da aplicação do herbicida, as plantas submetidas à deriva de 5 e 10% emitiram novas folhas, mas essas folhas apresentavam sintomas característicos de fitointoxicação por 2,4-D, folhas menores, contorcidas e com clorose. Dependendo da dose a que as plantas são expostas, é possível que alguns parâmetros morfológicos, como, por exemplo, o número de folhas, consigam voltar ao estágio anterior à contaminação por herbicida (Borges *et al.*, 2021). Em alguns casos, a biomassa vegetal acima do solo e a altura das plantas submetidas à deriva de herbicidas auxínicos conseguem se recuperar parcial ou totalmente, apesar dos danos sofridos durante a exposição (Ramos *et al.*, 2021).

A contaminação de 2,4-D em *E. contortisiliquum*, *L. ferrea*, *M. caesalpinifolia*, *M. tenuiflora* e *P. aculeata* não provocou alteração do número de folhas em nenhuma das doses avaliadas (Tabela 2). Para a espécie *E. contortisiliquum*, foi observado incremento da área foliar na deriva de 10% de 2,4-D (Tabela 3), o que pode ser explicado devido ao fenômeno hormese, onde subdoses de herbicidas podem promover o aumento da área foliar de algumas plantas (Borges *et al.*, 2021).

A redução do número de folhas na deriva de 20%, foi de 67 % na *C. glaziovii* (Tabela 2). A área foliar dessa espécie foi reduzida em todas as doses na comparação ao controle, tendo ocorrido a maior redução da área foliar (68%) na deriva de 20% (Tabela 3).

Tabela 3 – Área foliar (cm²) de espécies florestais pertencentes aos biomas da Caatinga e Cerrado submetidas à deriva simulada do herbicida 2,4-D.

Espécies	Doses (g.e.a.ha ⁻¹)				
	0	33,5	67,0	100,5	134,0
<i>A. urundeuva</i>	1095,14a	621,61b	457,93b	573,06b	651,25b
<i>C. glaziovii</i>	1567,94a	868,29b	801,55b	695,08b	501,80b
<i>E. contortisiliquum</i>	1032,24b	976,10b	1330,67a	922,75b	1028,03b
<i>H. impetiginosus</i>	1247,63a	1338,84a	680,48c	1073,90b	487,55c

<i>L. ferrea</i>	944,45a	1044,57a	804,11b	729,16b	641,14b
<i>M. caesalpiniifolia</i>	983,35a	901,32a	979,95a	983,26a	961,04a
<i>M. tenuiflora</i>	654,04a	343,66c	299,52c	497,81b	537,17b
<i>P. stipulacea</i>	435,64a	304,23b	234,02b	239,00b	235,85b
<i>P. aculeata</i>	369,00a	293,07a	266,95a	211,99b	226,48b
<i>T. aurea</i>	849,38a	308,00c	682,16b	745,13a	608,06b
CV (%)	30,14				

Fonte: O autor (2025). Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P \leq 0,05$). CV= Coeficiente de variação.

M. caesalpiniifolia não sofreu redução da área foliar (Tabela 3) quando exposta ao 2,4-D, o que sugere que as folhas dessa espécie possuem alguma barreira que impede a entrada do herbicida ou algum mecanismo de metabolização do herbicida mais eficiente que as demais espécies. De acordo com Borges *et al.* (2021), espécies presentes no bioma da Caatinga e do Cerrado brasileiro podem apresentar mecanismos capazes de metabolizar herbicidas.

A contaminação por deriva de 2,4-D reduziu o número de folhas (Tabela 2) e o desenvolvimento das lâminas foliares em *H. impetiginosus* nas derivas 10, 15 e 20 % (Tabela 3). A deriva correspondente a 20 % da dose recomendada provocou reduções severas do número de folhas (9) e área foliar (487,55cm). Para *T. aurea*, o impacto da exposição ao 2,4-D só foi observado na deriva de 20 %, com redução no número de folhas, entretanto a área foliar foi afetada negativamente em 5, 10 e 20 % de deriva de 2,4-D (Tabela 3).

O acúmulo de cera epicuticular em espécies florestais dos Biomas da Caatinga e Cerrado provavelmente pode reduzir a intoxicação dessas plantas quando expostas à deriva por herbicida, devido à menor absorção pelas folhas (Borges *et al.*, 2021). A absorção de 2,4-D pelas folhas pode variar de acordo com a idade, pois folhas em desenvolvimento apresentam cera epicuticular menos espessa e têm composição química variável quando comparada a folhas maduras (Peterson *et al.*, 2016). A metabolização do herbicida 2,4-D varia entre os diferentes tecidos vegetais, refletindo especificidades enzimáticas e fisiológicas que modulam sua biotransformação e acúmulo (Kudsk *et al.*, 2017).

A altura da planta é outro parâmetro importante na avaliação do impacto de herbicida por deriva em espécies florestais. As espécies florestais apresentaram comportamentos diferentes quando submetidas às doses de 2,4-D via deriva (Tabela 4). As espécies *L. ferrea*, *A. urundeuva* e *P. stipulacea* apresentaram limitação ao crescimento das plantas nas derivas de 15 e 20 %. A menor produção de fotoassimilados devido a danos no aparelho fotossintético dessa

planta, como intensa clorose foliar e queda de folhas, provavelmente foi responsável pelo menor acúmulo de carbono, afetando, conseqüentemente, o crescimento do caule (Cabral *et al.*, 2023).

Não foram observados efeito da contaminação de 2,4-D na altura das espécies: *C. glaziovii*, *M. caesalpiniifolia*, *M. tenuiflora*, *P. aculeata* e *T. aurea* (Tabela 4). Apesar da espécie *C. glaziovii* apresentar mais sensibilidade do que as demais espécies no que diz respeito à redução do número de folhas (67%) e área foliar (68%); mesmo efeito não foi verificado na altura, sugerindo que as partes das plantas não são sensíveis igualmente quando expostas à deriva de 2,4-D (Ramos *et al.*, 2021).

As diferentes partes das plantas podem metabolizar o 2,4-D. Essa sensibilidade diferencial entre as partes das plantas ocorre porque as auxinas são reguladas temporal e espacialmente na planta (Ramos *et al.*, 2021). Por exemplo, raízes, folhas e flores em seus diferentes estágios de desenvolvimento podem biossintetizar suas próprias auxinas, portanto a homeostase das auxinas difere naturalmente de acordo com o tecido vegetal (Ramos *et al.*, 2021).

Plantas nativas podem metabolizar herbicidas devido à presença de compostos bioativos. Análises fitoquímicas de *Mimosa Caesalpiniifolia* revelaram uma diversidade de compostos bioativos com propriedades medicinais e atividade antioxidante (Oliveira *et al.*, 2024). Dentre os metabólitos identificados nas folhas, esses autores encontraram como destaque a catequina, um polifenol concentrado que apresenta potente ação contra radicais livres. A catequina tem sido descrita como um composto capaz, mesmo em concentrações traço, de potencializar significativamente a degradação de poluentes orgânicos, como o 2,4-diclorofenol (Li, Wu e Dong, 2022), sugerindo possível diminuição do 2,4-D e ausência de sintomas encontrados nessa pesquisa para a espécie.

No entanto, os mecanismos pelos quais os níveis de auxina endógena são regulados são complexos e tornam difícil prever o impacto total da deriva sobre as plantas, principalmente avaliando apenas algumas características (Ramos *et al.*, 2021). Entretanto, algumas respostas comuns são relatadas, como redução da altura das plantas, biomassa e produção de flores (Iriart *et al.*, 2020). Uma melhor compreensão sobre como as plantas conseguem biossintetizar auxina em diferentes partes quando expostas à deriva de herbicidas auxínicos seria quantificar os níveis endógenos de auxinas e outros fitohormônios por tecido após a exposição (Ramos *et al.*, 2021).

Efeito positivo sobre o crescimento foi observado na deriva de 5 % para a espécie *A. urundeuva*, com ganho médio de aproximadamente 3,25 cm, entretanto redução do crescimento foi observada nas derivas de 10, 15 e 20% (Tabela 4). A influência positiva de hormônios vegetais como o ácido naftalenoacético (ANA) na indução de novas folhas em *Astronium*

urundeuva já foi demonstrada em estudos anteriores (Silva *et al.*, 2021). Além disso, a germinação *in vitro* e a micropropagação da espécie, por meio da aplicação de diferentes concentrações de 6-benzilaminopurina (BAP) em tipos de explantes, mostraram-se eficazes para a multiplicação vegetativa de *A. urundeuva*, com respostas morfogênicas positivas (Nascimento *et al.*, 2020). Esses achados suportam a evidência de que, em baixas concentrações, o 2,4-D pode provocar efeitos positivos na produção foliar da espécie.

Tabela 4. Altura de espécies florestais pertencentes aos biomas da caatinga e do Cerrado brasileiro expostas à contaminação por deriva do herbicida 2,4-D.

Espécies	Doses (g.e.a.ha ⁻¹)				
	0	33,5	67,0	100,5	134,0
<i>A. urundeuva</i>	55,88b	59,13 ^a	46,25c	36,50c	42,75c
<i>C. glaziovii</i>	64,00a	62,75 ^a	65,50a	51,75a	50,50a
<i>E. contortisiliquum</i>	76,00b	87,25 ^a	88,00a	65,25b	71,00b
<i>H. impetiginosus</i>	27,25b	40,50 ^a	21,25b	28,75b	22,25b
<i>L. férrea</i>	97,25b	110,88 ^a	96,00b	79,38c	68,13c
<i>M. caesalpiniiifolia</i>	54,00a	51,00a	49,50a	58,25a	58,50a
<i>M. tenuiflora</i>	75,25a	80,13 ^a	61,50a	63,13a	69,25a
<i>P. stipulacea</i>	123,50a	116,75 ^a	101,25b	91,00c	69,50c
<i>P. aculeata</i>	91,00a	81,50 ^a	78,63a	81,88a	81,50a
<i>T. aurea</i>	29,75a	30,63a	29,00a	29,25a	30,00a
CV (%)	15,51				

Fonte: O autor (2025). Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos (P<0,05). CV= Coeficiente de variação.

A exposição à contaminação por 2,4-D (5 e 10% de deriva) promoveu o crescimento da espécie *E. contorsiliquum*, entretanto as derivas de 15 e 20 % não promoveram alterações no crescimento desta espécie. As mudas da espécie *P. stipulacea* apresentaram efeito positivo na altura, quando submetidas à deriva de 5 %. Para as demais doses avaliadas, porém, a contaminação por deriva de 2,4-D reduziu o crescimento das plantas dessa espécie.

O crescimento de raízes não foi afetado pela deriva de subdoses do herbicida 2,4-D para todas as espécies avaliadas (Tabela 5). Esse fato é oposto ao encontrado na literatura, pois o herbicida 2,4-D pode ocasionar folhas deformadas, com a face inferior orientada para cima, folhas em todas as direções, superbrotamento de folhas, caule com o diâmetro maior, apresentando rachaduras e nódulos, curvatura do caule, redução do número de folhas, crescimento e maior produção de raiz (Islam *et al.*, 2018).

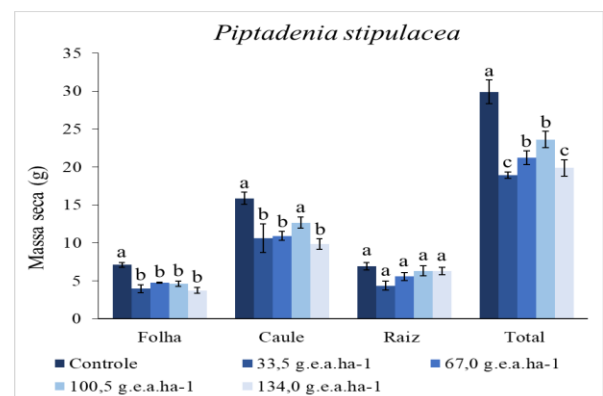
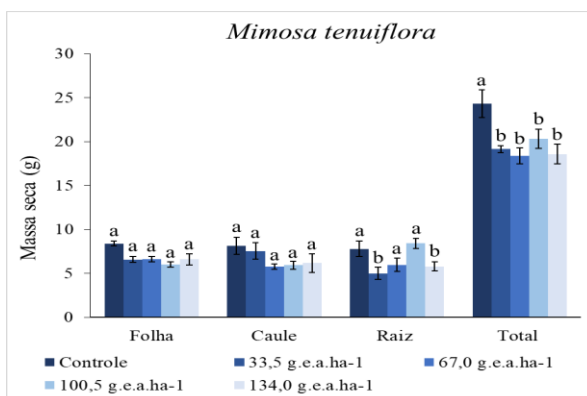
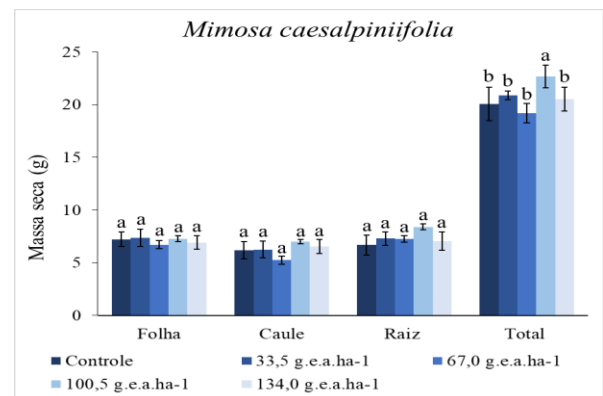
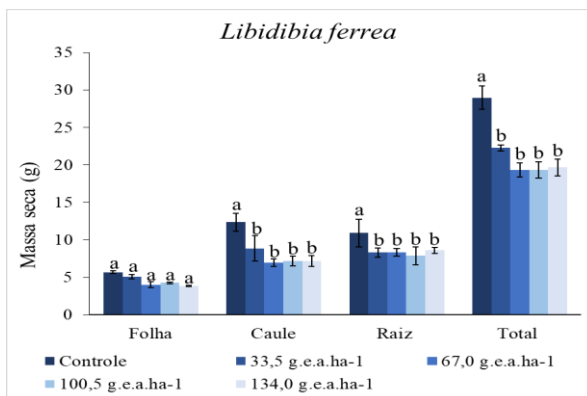
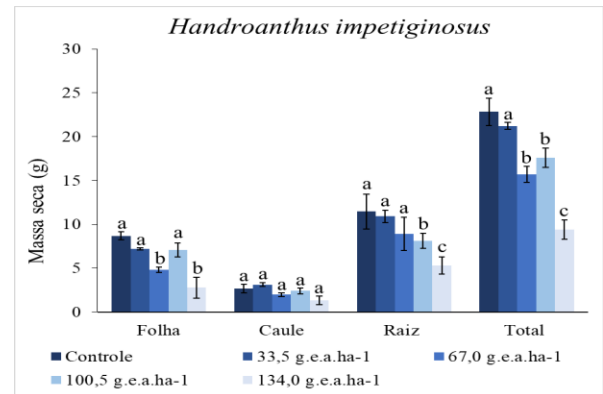
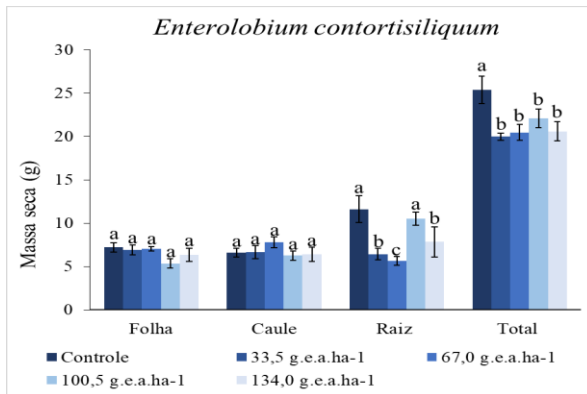
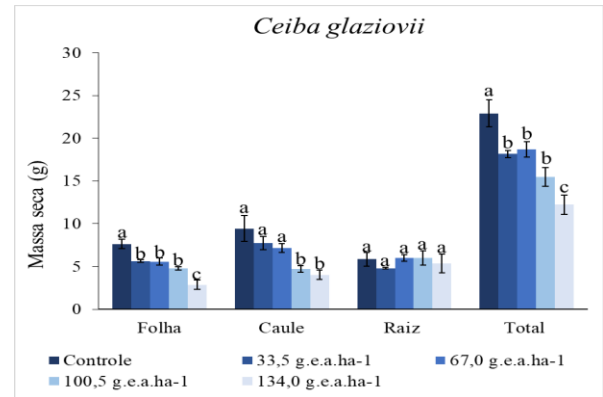
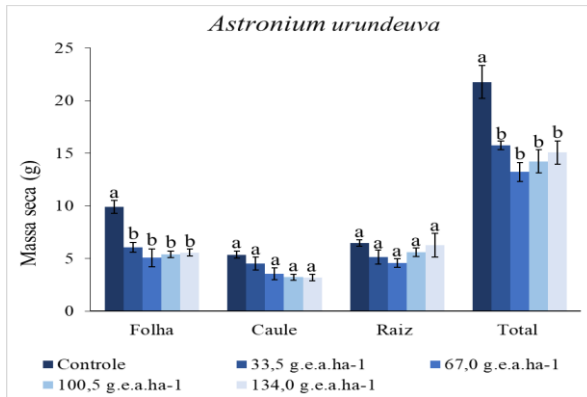
Tabela 5 – Comprimento de raiz de espécies florestais dos biomas da Caatinga e Cerrado submetidas à deriva simulada do herbicida 2,4-D.

Espécies	Doses (g.e.a.ha ⁻¹)				
	0	33,5	67,0	100,5	134,0
<i>A. urundeuva</i>	31,75a	34,00a	25,50a	29,75a	27,75a
<i>C. glaziovii</i>	45,40a	40,75 ^a	39,00a	44,75a	37,75a
<i>E. contortisiliquum</i>	36,00a	37,25 ^a	35,50a	38,00a	37,25a
<i>H. impetiginosus</i>	36,75a	38,50 ^a	34,25a	38,00a	37,00a
<i>L. férrea</i>	37,00a	35,75 ^a	37,75a	39,00a	33,75a
<i>M. caesalpiniifolia</i>	36,50a	46,75 ^a	41,50a	35,50a	40,25a
<i>M. tenuiflora</i>	39,25a	40,00a	44,00a	39,00a	37,50a
<i>P. stipulacea</i>	41,25a	41,50 ^a	35,50a	35,00a	33,25a
<i>P. aculeata</i>	38,00a	36,00a	39,75a	35,50a	33,50a
<i>T. aurea</i>	32,50a	35,00a	28,00a	35,00a	29,25a
CV (%)	14,6				

Fonte: O autor (2025). Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos (P<0,05). CV= Coeficiente de variação.

Apesar do comprimento das raízes não ser afetado pela exposição ao 2,4-D, o peso seco da raiz foi afetado negativamente em algumas espécies (Figura 1). A redução do acúmulo de biomassa seca da raiz acende um alerta para o estabelecimento dessas espécies, principalmente por estarem inseridas em ambientes de clima quente e seco, com escassez de chuva, o que pode comprometer o estabelecimento dessas espécies (Borges *et al.*, 2021).

A deriva simulada de 2,4-D provocou redução da massa seca em diferentes partes das plantas (Figura 1). Em relação ao peso seco das folhas, as espécies *M. urundrueva*, *C. glaziovii*, *H. impetiginosus*, *P. stipulacea* e *T. aurea* sofreram redução do peso da massa seca foliar (Figura 1). A espécie *C. glaziovii* teve reduções significativas do acúmulo de biomassa seca foliar, quando submetida à deriva do herbicida 2,4-D. As mudas da espécie *H. impetiginosus* apresentaram reduções da deriva de 10 e 20 % da dose recomendada para o 2,4-D (Figura 1).



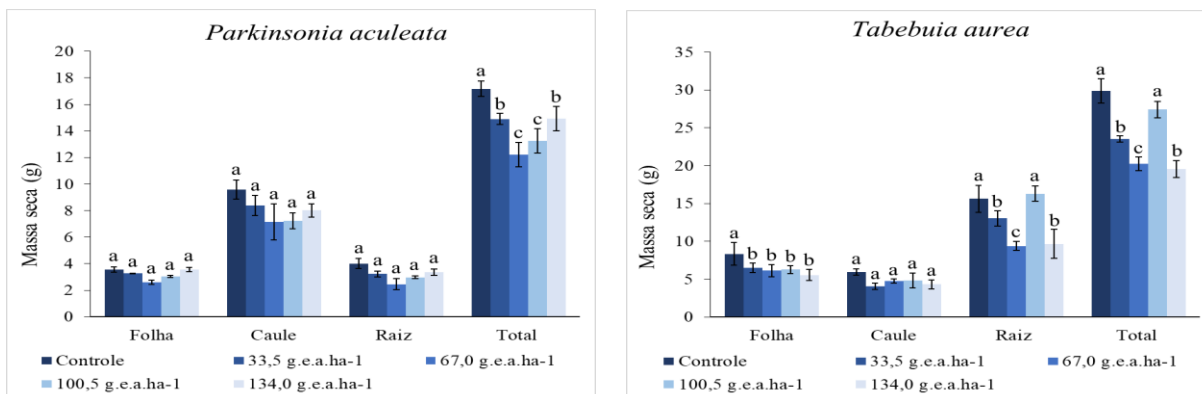


Figura 1. Peso da massa seca da folha, caule, raiz e total de espécies florestais dos biomas da Caatinga e do Cerrado, submetidas à deriva simulada de 2,4-D. Fonte: O autor (2025).

A contaminação por 2,4-D leva ao acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), interrompe os canais de cálcio e a divisão celular, produz defeitos na parede celular e membrana, resultando na morte celular localizada (Bhat *et al.*, 2015).

E. contortisiliquum, *L. ferrea*, *M. caesalpiniifolia*, *M. tenuiflora* e *P. aculeata* não sofreram impacto negativo no acúmulo de biomassa seca foliar, mostrando que essas espécies podem apresentar diferentes mecanismos de tolerância à deriva por 2,4-D e conseguir se reestabelecer mesmo após a contaminação por herbicidas. Alguns fatores podem influenciar a resposta de espécies florestais à contaminação por herbicida, destacando-se: mecanismos de metabolismo, anatomia das folhas, espessura da cera epicuticular, a dose de herbicida que chega às folhas, a temperatura, velocidade do vento e umidade presentes no momento da deriva (Borges *et al.*, 2021).

Em relação ao peso da massa seca do caule, as espécies apresentaram diferentes comportamentos em relação a exposição à deriva simulada por 2,4-D. *C. Glaziovii*, *L. ferrea* e *P. stipulacea* apresentaram redução do acúmulo de biomassa do caule. Na espécie *C. glaziovii*, a redução da massa seca do caule foi observada nas derivas de 15 e 20 %. Na espécie *L. ferrea*, foram observadas reduções do peso seco do caule em todas as doses. Na *P. stipulacea*, foram observadas reduções do peso seco do caule nas derivas de 5, 10 e 20 %. As demais espécies não apresentaram reduções do peso da massa seca do caule quando submetidos à exposição à deriva pelo herbicida.

O peso seco da raiz também teve comportamento diferente de acordo com a espécie avaliada. *E. cortosiliquum*, *H. impetiginosus*, *L. ferrea*, *M. tenuiflora* e *T. aurea* sofreram redução do peso da massa seca da raiz. Por sua vez, as espécies *A. urundeuva*, *C. glaziovii*, *M. caesalpiniifolia*, *P. aculeata* e *P. stipulacea* não apresentaram redução do peso seco da raiz quando exposta à deriva de 2,4-D.

A redução da massa seca acumulada das raízes e caules de algumas espécies pode ter sido provocada pelos danos causados nas folhas após a exposição ao herbicida 2,4-D. O herbicida pode ter comprometido o aparelho fotossintético, e a falta de fotoassimilados pode ter inibido o acúmulo de biomassa seca do caule e das raízes. A aplicação de herbicidas pode comprometer o acúmulo de biomassa seca de caule e raízes de espécies florestais presentes nos biomas da Caatinga e do Cerrado (Borges *et al.*, 2021). Esse fato é importante, tendo em vista que a redução do volume das raízes pode prejudicar o estabelecimento de espécies florestais presentes na Caatinga e no Cerrado, principalmente em épocas quentes e secas.

Com exceção da *M. caesalpinifolia*, que teve acúmulo da massa seca total na deriva de 15 %, as demais espécies sofreram redução do acúmulo de massa seca total. As espécies *C. glaziovii* e *H. impetiginosus* foram as que mais sofreram com a deriva de 2,4-D, com redução do peso da biomassa seca total de 47 e 49 %, respectivamente, quando comparada ao controle.

A redução do peso seco total da biomassa pode refletir o processo de desregulação do crescimento de plantas expostas ao herbicida 2,4-D (Grossmann, 2010; Triques *et al.*, 2021).

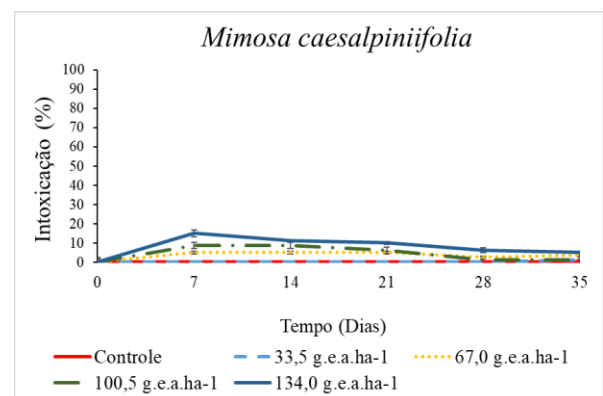
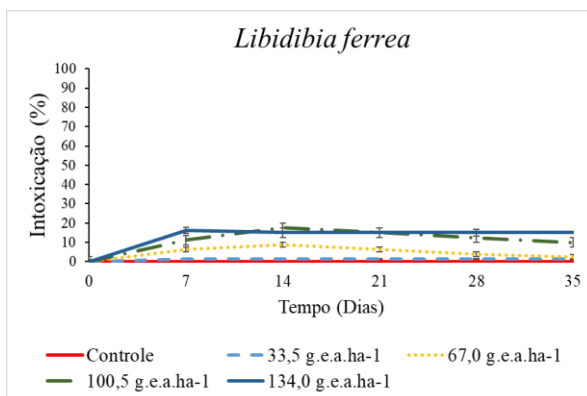
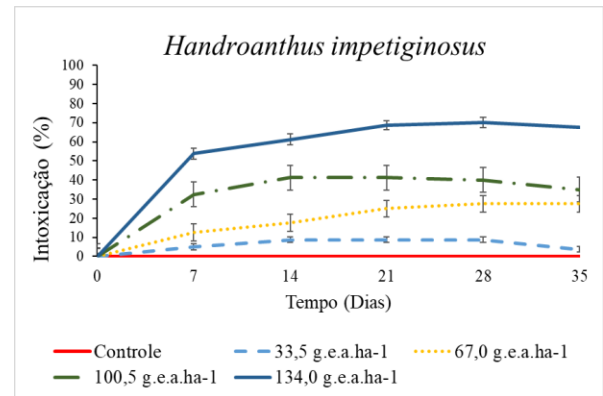
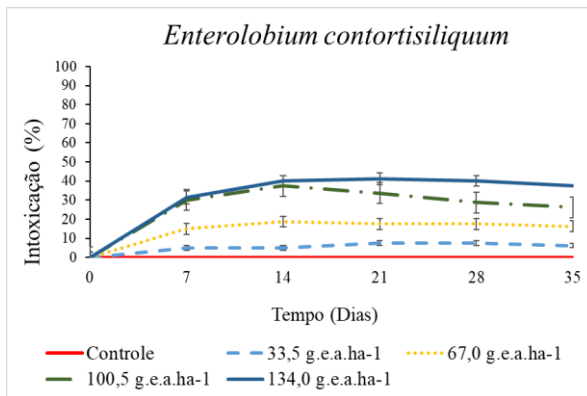
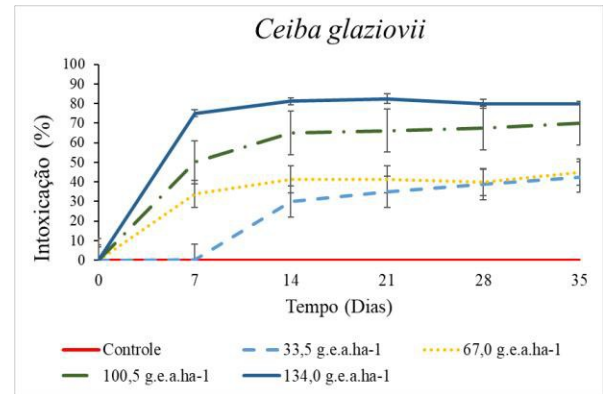
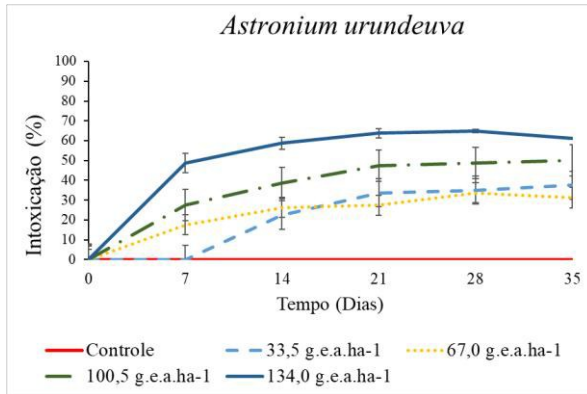
Esse processo pode provocar desequilíbrio da homeostase da auxina e interações com outros hormônios importantes nos tecidos (Triques *et al.*, 2021). De acordo com Grossmann (2010), a overdose de auxina ocorre primeiramente com um estímulo para o desenvolvimento da planta, apresentando crescimento anormal, podendo ocorrer posterior inibição do crescimento da raiz ou parte aérea, com fechamento dos estômatos, redução da respiração e superprodução de espécies reativas de oxigênio (ROS). Em seguida, acontecem a senescência e deterioração tecidual, aceleradas devido ao dano no cloroplasto, clorose progressiva e destruição da membrana e da integridade do sistema vascular.

As maiores reduções da biomassa seca total das espécies ocorreram na deriva de 20 % (134,0 g.e.a.ha⁻¹). O 2,4-D atua como a auxina, que regula vários processos fisiológicos na planta. Em altas concentrações nos tecidos vegetais, o herbicida, assim como a auxina, promove a morte da planta devido ao desequilíbrio provocado nas vias metabólicas primárias e secundárias da célula vegetal (Cabral *et al.*, 2023).

A espécie *M. caesalpinifolia* apresentou incremento no peso seco total da biomassa quando exposta à deriva de 15 %. Isso provavelmente ocorreu devido ao efeito hormese, no qual subdoses de um herbicida podem incrementar o desenvolvimento das plantas, permitindo maior acúmulo de carbono. Esse efeito é conhecido como hormese, entretanto as explicações fisiológicas e metabólicas envolvidas na hormese ainda não são claras (Cabral *et al.*, 2023).

As mudas de espécies florestais quando expostas à deriva de 2,4-D apresentaram diferentes níveis de tolerância (Figura 2). Os principais sintomas visuais foram a epinastia de

folhas e caules, clorose e queda das folhas, sintomas de fitointoxicação característicos de herbicidas auxínicos (Cabral *et al.*, 2023).



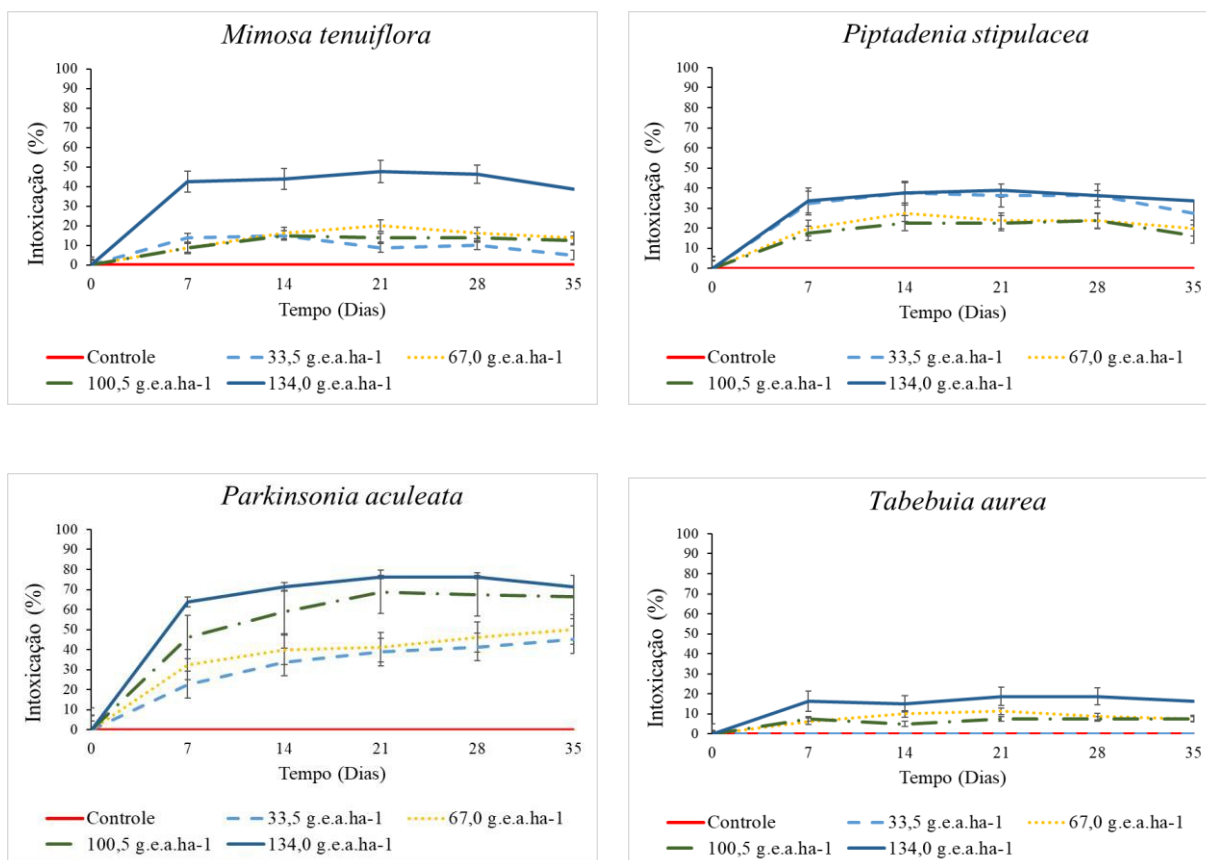


Figura 2. Porcentagem de intoxicação em mudas de espécies florestais dos Biomas da Caatinga e Cerrado submetidas a subdoses do herbicida 2,4-D. Fonte: O autor (2025).

A rápida perda de folhas em algumas plantas é consequência da exposição à deriva do herbicida 2,4-D (Queiroz *et al.*, 2020). Os herbicidas auxínicos têm ação direta, pois induzem a biossíntese de etileno por meio da biossíntese de etileno a partir da síntese de ACC (ácido 1-aminociclopropano-1-carboxílico). Na via de ação indireta, o etileno estimula a produção de ácido abscísico (ABA). O ácido abscísico inibe a divisão e expansão celular enquanto o etileno promove a senescência foliar (Marcato *et al.*, 2017).

Dentre as espécies avaliadas, a *M. Caesalpinifolia* apresentou poucos sintomas de intoxicação visual aos 35 dias após aplicação na deriva de 20 %. A intoxicação visual máxima observada para essa espécie foi de 15% aos sete dias após a simulação da deriva na deriva de 20 %, com a fitotoxicidade reduzindo para 5 % aos 35 dias após a aplicação (Figura 2).

Os sintomas leves de intoxicação das espécies *M. caesalpinifolia*, *T. aurea* e *L. ferrea* sugerem a presença de diferentes mecanismos de tolerância, como, por exemplo, o metabolismo da molécula de 2,4-D, sendo a aril hidroxilação do 2,4-D a principal rota para o metabolismo (Islam *et al.*, 2018). A metabolização da molécula de 2,4-D resulta na perda da capacidade auxínica do herbicida, facilitando a conjugação da molécula do herbicida com aminoácidos e

outros constituintes da planta, exsudação radicular e estágio de desenvolvimento da planta (Islam *et al.*, 2018).

As mudas de *L. ferrea* apresentaram sintomas leves de intoxicação, provavelmente devido à proteção decorrente ao acúmulo de cera epicuticular, uma vez que essa espécie também sofreu sintomas leves de intoxicação quando exposta a subdoses de glifosato (Borges *et al.*, 2021). Além disso, o acúmulo de cera epicuticular é uma estratégia de sobrevivência observada em espécies florestais de alta incidência nos biomas da Caatinga e do Cerrado brasileiro. A cera epicuticular atua reduzindo a perda de água nessas espécies. Entretanto, de acordo com Borges *et al.* (2021), características anatômicas das folhas podem resultar em diferentes respostas na absorção foliar aos herbicidas.

C. glaziovii foi a espécie mais sensível à contaminação por deriva simulada de 2,4-D. Na deriva simulada de 20 % de 2,4-D, aos sete dias, a intoxicação foi de 75%, apresentando sintomas como epinastia e senescência foliar, mantendo os sintomas de intoxicação aos 35 dias após a aplicação. Isso pode sugerir que o 2,4-D pode atuar como agente de seleção para essa espécie, principalmente nos estágios iniciais de desenvolvimento.

O contato entre plantas não alvo e herbicidas por deriva pode provocar a supressão de crescimento de espécies vegetais sensíveis e até a morte dessas plantas (Florescia *et al.*, 2017). O herbicida 2,4-D pode promover a diminuição de espécies sensíveis, provocando perda da diversidade florística, devido aos efeitos tóxicos, dependendo da frequência de exposição, da dose e de características morfofisiológicas de cada espécie (Brochado *et al.*, 2022).

Esses resultados trazem informações relevantes sobre o impacto da contaminação por deriva de 2,4-D em espécies florestais pertencentes ao Cerrado e à Caatinga. A contaminação do herbicida 2,4-D por via deriva simulada pode restringir de forma diferente o crescimento das espécies. Isso reforça o risco potencial que o 2,4-D na diversidade florística desses biomas, tanto em áreas de recuperação quanto em áreas de preservação permanente.

CONCLUSÕES

As espécies florestais apresentaram diferentes níveis de sensibilidade quando expostas à contaminação por deriva do herbicida 2,4-D. As partes das plantas apresentam sensibilidade diferencial à contaminação por deriva. A maior deriva (20%) afetou negativamente a maioria dos parâmetros morfológicos das espécies avaliadas. As espécies mais sensíveis à deriva de 2,4-D são *C. glaziovii* e *H. impetiginosus*, que apresentaram sintomas grave de necrose, redução do número de folhas, da área foliar e da massa seca total. O herbicida 2,4-D pode atuar como

agente selecionador de espécies presentes no bioma da Caatinga e Cerrado brasileiro, afetando a diversidade florística desses biomas. Portanto, estratégias de conservação de áreas do Cerrado e da Caatinga devem ser avaliadas em estudos futuros, devido à importância ambiental desses biomas.

REFERÊNCIAS

- AKESSON, N. B.; YATES, W. Problems relating to application of agricultural chemicals and resulting drift residues. **Annual reviews further**, v. 9, p. 285-318, 1964.
- BHAT, S. V.; BOOTH, S. C.; VANTOMME, E. A. N.; AFROJ, S.; YOST, C. K.; DAHMS, T. E. S. Oxidative stress and metabolic perturbations in *Encherichia coli* exposed to sublethal levels of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid. **Chemosphere**, v. 135, p. 453-461, 2015.
- BORGES, M. P. S.; SILVA, D. V.; SOUZA, M. F.; SILVA, T. S.; TEÓFILO, T. M. S. SILVA, C. C.; PAVÃO, Q. S.; PASSOS, A. B. R. J.; SANTOS, J. B. Glyphosate effects on tree species natives from Cerrado and Caatinga Brazilian biome: Assessing sensitivity to two ways of contamination. **Science of the Total Environment**, v. 769, e. 144113, 2021.
- BROCHADO, M. G. S.; MEILKE, K. C. PAULA, D. F.; LAUBE, A. F. S.; DE LA CRUZ, R. A.; GONZATTO, M. P.; MENDES, K. F. Impacts of dicamba and 2,4-D drift on ‘Ponkan’ mandarin seedlings, soil microbiota and *Amaranthus retroflexus*. **Journal of Hazardous Material Advances**, n. 6, e 100084, 2022.
- BUTOVA, V. V.; BAUER, T. V.; POLYAKOV, V. A.; RAJPUT, V. D.; MINKINA, T. M. Analyzing the benefits and limitations of advanced 2,4-D herbicide delivery systems. **Crop Protection**, v. 184, e. 106865, 2024.
- CABRAL, C. M.; SOUZA, M. F.; ALENCAR, B. T. B.; FERREIRA, E. A.; SILVA, D. V.; REGINALDO, L. T. R. T.; SANTOS, J. B. Sensibility, multiple tolerance and degradation capacity of forest species to sequential contamination of herbicides in groundwaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 448, e. 130914, 2023.
- CARVALHO, K. S.; CRUZ, R. C. D.; SOUZA, I. A. Plant species from Brazilian Caatinga: a control alternative for *Aedes aegypti*. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 26. n. 2, e. 102051, 2023.
- EGAN, J. F.; BOHNENBLUST, E.; GOSLEE, S.; MORTENSEN, D.; TOOKER, J. Herbicide drift can affect plant and arthropod communities. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 185, p. 77-87, 2014.
- FERREIRA, M. F. TORRES, C.; BRACAMONTE, E.; GALETTO, L. Glyphosate affects the susceptibility of non-target native plant species according to their stage of development and degree of exposure in the landscape. **Science of the Total Environmet**, v. 865, e. 161091, 2023.

FLORENCIA, F. M.; CAROLINA, T.; BRACAMONTE, E.; GALETTO, L. Effects of the herbicide glyphosate on non-target planta native species from Chaco forest (Argentina). **Ecotoxicology and Environmetal Safety**, n. 144, p. 360-368, 2017.

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

IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente, 2023. Relatórios de comercialização de agrotóxicos. **Os 10 ingredientes ativos mais vendidos – 2023 – consolidação de dados fornecidos pelas empresas registrantes de produtos técnicos, agrotóxicos e afins, conforme o art. 41 do Decreto nº 4074/2002**. Disponível em: Relatórios de comercialização de agrotóxicos — Ibama (www.gov.br). Acesso em: 07 jul. 2025.

IRIART, B.; BAUCOM, R. S.; ASHMAN, T. L. Herbicides as anthropogenic drivers of eco-evo feedbacks in plant communities at the agro-ecological interface. **Molecular Ecology**, v. 30, p. 5406-5421, 2020.

ISLAM, F.; WANG, J.; FAROOQ, M. A.; KHAN, M. S. S.; XU, L.; ZHU, J.; ZHAO, M.; MUNOS, S.; LI, Q. X.; ZHOU, W. Potential impact of the herbicide 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on human and ecosystems. **Environment International**, v. 111, p. 332-351, 2018.

KUDSK, P.; HATCHER, P. E.; GROUND-WILLIAMS, R. J. Optimising herbicide performance. **Weed research: Expanding horizons**, v. 1, p.149-179, 2017.

LAHSEN, M.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DALLA-NORA, E. L. Undervaluing and Overexploiting the Brazilian Cerrado at Our Peril. **Environment: Science and Policy for Sustainable Development**, v. 58, n. 6, p. 4-15, 2016.

MARCATO, A. C. C.; SOUZA, C. P & FONTANETTI, C. S. Herbicide 2,4-D: A review of Toxicity on Non-Target Organisms. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 228, n. 120, p. 1-12, 2017.

NASCIMENTO, A. V. S.; MENDONÇA, A. M. C.; SILVA JÚNIOR, C. D.; SANTANA, M. C.; SANTOS, P. A. A. In vitro germination and micropropagation of *Myracrodruon urundeuva* Allemão (Anacardiaceae). **Plant Cell culture & Micropropagation**, v. 16, e. 156, 2020.

NOGUEIRA NETO, F. A.; SOUZA, M. F.; BLAT, N. R.; SILVA, F. D.; FERNANDES, B. C. C.; CHAGAS, P. S. F.; ARAUJO, P. C. D.; LINS, H. A.; SILVA, D. V. Sensitivity and antioxidante response of forest species seedlings to the atrazine under simulated conditions of subsurface water contamination. **Chermosphere**, v. 360, e. 142411, 2024.

OLIVEIRA, V. C.; RODRIGUES, S. O.; SOUTO, S. M. T.; SILVA, G. A.; VILEGAS, W.; FERRI, B. G.; EL-GAZZAR, A. M.; BATILHA, G. S.; MAHMOUD, M. H.; SILVA, M. J. D.; PAGNOSSA, J. P.; SILVA, M. A. Chemical profile and evaluation of the pharmacological activity of the dry extract and fraction of ethyl acetate obtained from the leaves of *Mimosa caesalpiniiifolia*. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 323, e.117716, 2024.

PINTO, A.; AZENHA, M.; FIDALGO, F.; TEIXEIRA, J. 2,4-dichlorophenoxyacetic acid detoxification occurs primarily in tomato leaves by the glutathione D-transferase phi members 4 and 5. **Scientia Horticulturae**, v. 321, e. 112214, 2023.

QUEIROZ, A. R. S.; DELATORRE, C. A.; LUCIO, F. R.; ROSSI, C. V. S.; ZOBIOLE, L. H. S.; MERROTO JÚNIOR, A. Rapid necrosis: a novel planta resistance mechanism to 2,4-D. **Weed Science**, v. 68, n. 1, p. 6-18, 2020.

RAMOS, S. E.; RZODKIEWICZ, L. D.; TURCOTTE, M. M.; ASHMAN, T. L. Damage and recovery from drift of synthetic-auxin herbicide dicamba depends on concentration and varies among floral. Vegetative, and lifetime traits in rapid cycling Brassica rapa. **Science of the total environment**, v. 801, e. 149732, 2021.

SBPCD – Sociedade Brasileira de Ciência das Plantas Daninhas, 1995. **Procedimentos para instalação, avaliação e análise de experimentos com herbicidas**. Londrina, p.42.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3, p. 591-611, 1965.

SILVA, M. V. O.; ARAÚJO, F. S.; LEDRU, M. P. A palynological atlas of the Cerrado-Caatinga ecotone in northeastern Brazil. **Review of Palaeobotany and Palynology**, v. 321, e. 105023, 2024.

SILVA, T. S.; CARVALHO FILHO, R. S. L.; FONSECA, P. T.; SANTANA, J. R. F. *In vitro* shoot regeneration in *Myracrodruon urundeuva* Fr.All. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 51, e. 69269, 2021.

SOUZA, M. S.; ALVES, S. S. V.; DOMBROSKI, J. L. D.; FREITAS, J. D. B.; AROUCHA, E. M. M. Comparação de métodos de mensuração de área foliar para a cultura da melancia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 241-245, 2012.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANE, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3.ed. Rio de Janeiro: Empraba Solos, 2017.

TRIQUES, M. C.; OLIVEIRA, D.; GOULART, B. V.; MONTAGNER, C. C.; ESPÍNDOLA, E. L. G.; MENEZES-OLIVEIRA, V. B. Assessing single effects of sugarcane pesticides fipronil and 2,4-D on plants and soil organisms. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, e. 111622, 2021.

LI, Y.; WU, Y.; DONG, W. Trace catechin enhanced degradation of organic pollutants with activated peroxy monosulfate: Comprehensive identification of working oxidizing species. **Chemical Engineering Journal**, v. 429, e. 132408, 2022.