



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE
MESTRADO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE

DÉBORA SILVA MARCELINO DE SOUSA

IMPACTO AMBIENTAL DO DIQUAT SOBRE ESPÉCIES FLORESTAIS

MOSSORÓ - RN

2023

DÉBORA SILVA MARCELINO DE SOUSA

IMPACTO AMBIENTAL DO DIQUAT SOBRE ESPÉCIES FLORESTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Tecnologia e Sociedade à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Linha de pesquisa: Tecnologias Sustentáveis e Recursos Naturais Do Semi-Árido.

Orientador: Prof. Dr. Sc. Daniel Valadão Silva.

MOSSORÓ - RN

2023

© 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.

Si Silva Marcelino de Sousa, Débora.
 IMPACTO AMBIENTAL DO DIQUAT SOBRE ESPÉCIES
FLORESTAIS / Débora Silva Marcelino de Sousa. -
2023.
 50 f. : il.

 Orientador: Daniel Valadão da Silva .
 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2023.

 1. contaminação ambiental. 2. transporte de
herbicida. 3. herbicida. I. , Daniel Valadão da
Silva, orient. II. 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.

DÉBORA SILVA MARCELINO DE SOUSA

IMPACTO AMBIENTAL DO DIQUAT SOBRE ESPÉCIES FLORESTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente Tecnologia e Sociedade a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ambiente, Tecnologia e Sociedade.

Linha de pesquisa: Tecnologias Sustentáveis e Recursos Naturais Do Semi-Árido.

Orientador: Prof. Dr. Sc. Daniel Valadão Silva.

Defendida em: 22/12/ 2023

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



DANIEL VALADAO SILVA

Data: 05/04/2024 14:18:47-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Valadão Silva (UFERSA)

Presidente (Orientador)

Documento assinado digitalmente



ANA BEATRIZ ROCHA DE JESUS PASSOS

Data: 22/12/2023 17:57:35-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Ana Beatriz Rocha de Jesus Passos (UFERSA)

Interno à Instituição

Documento assinado digitalmente



POLIANA COQUEIRO DIAS ARAUJO

Data: 22/12/2023 17:32:42-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Poliana Coqueiro Dias Araújo (UFERSA)

Interno à Instituição

Documento assinado digitalmente



JOSE BARBOSA DOS SANTOS

Data: 22/12/2023 17:40:43-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Barbosa dos Santos (UFVJM)

Externo à Instituição

*Dedico este trabalho ao melhor
amigo, espírito santo de Deus que
habita em mim.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu eterno pai celestial por ter me capacitado até aqui. Aos meus pais por me darem condições de estudar e alcançar meus objetivos.

As minhas irmãs Daniela Marcelino e Dyana Marcelino, que me ajudaram na preparação para a montagem do meu experimento, eu amo vocês, meninas.

Ao meu orientador, Professor Doutor Daniel Valadão, por ter lutado junto comigo, me apoiando, sendo solícito e amigo em meio a uma depressão que enfrentei, eu soube que não estive sozinha pois ele sempre esteve disponível para me ajudar, minha eterna gratidão professor.

A todo o grupo NOMATO pela paciência e disposição em me ajudar até mesmo quando eu não colaborava emocionalmente. Agradecimentos especiais para Arthur Allan que esteve ajudando na condução do início ao fim. Valdivia que sempre me ouvia, obrigada por seu coração tão manso. Carolina Ramirez por sempre está disposta ajudar, eu sempre a admirei. Luma Lorena pela sua excepcional manobra em carregar quatro sacos de solo de uma vez, ao mesmo tempo que pilotava com apenas uma mão, uma moto três vezes maior que ela, garantindo a montagem do meu experimento.

As minhas melhores amigas do coração Yansen Herrera e Alana Mayara que me abraçaram emocionalmente e estiveram comigo durante esses dois anos, eu amo vocês duas.

Agradeço também aos meus amigos próximos do PPGATS Carlos Alberto, Hilgarde Ferreira e Ana Karla por serem sorrisos quando eu era apenas escuridão.

Agradeço também aos meus amigos de vida por serem apoio.

Ao meu noivo Régis Cavalcante, que sempre acreditou e me apoiou em todas as decisões.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à CAPES pela oportunidade concedida através da bolsa de estudos.

“Que a paz de Cristo seja o juiz em seu coração, visto que vocês foram chamados para viver em paz, como membros de um só corpo. E sejam agradecidos. Habite ricamente em vocês a palavra de Cristo; ensinem e aconselhem-se uns aos outros com toda a sabedoria e cantem salmos, hinos e cânticos espirituais com gratidão a Deus em seu coração. Tudo o que fizerem, seja em palavra seja em ação, façam-no em nome do Senhor Jesus, dando por meio dele graças a Deus Pai.

Colossenses 3:15-17

RESUMO

O uso frequente de herbicidas em locais próximos a áreas com vegetação nativa pode causar impacto ambiental negativo sobre as espécies de plantas sensíveis devido a ocorrência do transporte destes produtos para locais não alvo. O diquat é um dos herbicidas mais utilizados no Brasil e seus efeitos sobre as espécies florestais ainda é pouco conhecido. Nesta pesquisa foram simuladas a contaminação do diquat via deriva ou via capilaridade em solo visando avaliar os impactos do herbicida sobre dez espécies florestais frequentemente encontradas nos biomas da Caatinga e Cerrado brasileiro. Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, sendo no primeiro simuladas à deriva do diquat por meio da aplicação de cinco doses: 10% da dose comercial (0,24 g. i. a. ha⁻¹), 20% da dose comercial (0,48 g. i. a. ha⁻¹), 30% da dose comercial (0,72 g. i. a. ha⁻¹) e 50% da dose comercial (1,2 g. i. a. ha⁻¹) do produto comercial Reglone®. No segundo experimento foram avaliados os efeitos da contaminação de lençol freático raso com a disponibilidade do herbicida (1 ppm) para absorção via capilaridade em colunas preenchidas com solo. As espécies avaliadas foram: cumaru (*Amburana cearensis*), jatobá (*Hymenaea courbaril*), jurema branca (*Mimosa ophtalmocentra*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*), timbaúba (*Enterolobium contortisiliquum*), pereiro (*Aspidosperma pyrifolium*), aroeira (*Myracrodruon urundeuva*), barriguda (*C. umbrellata*), jucá (*Libidibia ferrea*), ipê-rosa (*T. rósea*), mororó (*Bauhinia cheilantha*), caraibeira (*Tabebuia aurea*), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*), turco (*Parkinsonia aculeata*) e sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*). As espécies apresentaram diferença na sensibilidade a deriva simulada de diquat. Maiores intoxicações visuais foram observadas para *A. cearenses*, *B. cheilantha* e *P. aculeata*, na maior dose do herbicida. O crescimento de *A. cearenses* e *M. tenuiflora* foram afetados negativamente pela deriva do diquat. A matéria seca total da *C. umbrellata*, *M. ophtalmocentra* foram reduzidos pelo fornecimento do diquat via capilaridade. Todavia, houve o maior crescimento de *T. rosea*, *M. tenuiflora*, *E. contortisiliquum* e *C. pyramidale*, provavelmente, por efeito hormese. Os resultados indicam que o diquat pode ter efeito de seleção de espécies quando ocorre deriva em elevadas taxas e com o constante contaminação de lençol freático raso.

Palavras-chaves: Contaminação ambiental. Transporte de herbicidas. Herbicida.

ABSTRACT

The frequent use of herbicides in locations close to areas with native vegetation can cause a negative environmental impact on sensitive plant species due to the transport of these products to non-target locations. Diquat is one of the most used herbicides in Brazil and its effects on forest species are still little known. In this research, diquat contamination via drift or capillarity in the soil was simulated in order to evaluate the impacts of the herbicide on ten species common in the Brazilian Caatinga and Cerrado biomes. The experiments were conducted in a greenhouse, with the first simulating the drift of diquat through the application of five doses of the herbicide. In the second experiment, the effects of shallow groundwater contamination were evaluated with the availability of the herbicide (1 ppm) for absorption via capillarity in columns filled with soil. The species evaluated were: cumaru (*Amburana cearensis*) jatobá (*Hymenaea courbaril*), white jurema (*Mimosa ophtalmocentra*), black jurema (*Mimosa tenuiflora*), timbaúba (*Enterolobium contortisiliquum*), pear tree (*Aspidosperma pyrifolium*), aroeira (*Myracrodruon urundeuva*), barriguda (*C. umbrellata*), jucá (*Libidibia ferrea*), ipê-rosa (*T. rósea*), nororó (*Bauhinia cheilantha*), caraibeira (*Tabebuia aurea*), catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*), turkish (*Parkinsonia aculeata*) and thrush (*Mimosa caesalpiniiifolia*). Among the species analyzed, *Amburana cearensis* proved to be the most sensitive to diquat, showing statistical differences in the number of leaves. *Aspidosperma pyrifolium* and *Mimosa tenuiflora* also showed notable sensitivity, manifesting significant variations in the number of leaves. *Libidibia ferrea*, *Mimosa tenuiflora* and *Tabebuia aurea* demonstrated potential sensitivity to seedling height. Regarding leaf area, several species, including *Amburana cearensis*, *Caesalpinia pyramidalis*, *Enterolobium contortisiliquum*, *Hymenaea courbaril* and *Tabebuia aurea*, revealed significant responses, suggesting a variability in sensitivity to diquat concentrations. In capillary exposure, *Mimosa oftalmocentra* and *Tabebuia aurea* exhibited a significant increase in leaf height and area, indicating a possible hormesis response at lower herbicide concentrations. *Mimosa tenuiflora* and *Tabebuia rosea* showed specific decreases in leaf area, possibly related to the species' adaptations to water stress and seasonality characteristic of cerrado and caatinga.

Keywords: Environmental contamination. Transport of herbicides. Herbicide.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Molécula do diquat.....	15
Figura 2 – Intoxicação visual em mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro dias após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,0; 1,2; 2,4; 3,6; 6,0 mL).	28
Figura 3 – Matéria seca da folha, caule, raiz e total em mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro expostas a diferentes concentrações do herbicida diquat por deriva (0,0; 1,2; 2,4; 3,6; e 6,0 mL).	38
Figura 4 – Matéria seca da folha, caule, raiz e total de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro expostas a 100 ppb de diquat por capilaridade.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Conceitos atribuídos à toxicidade de herbicidas, segundo a escala adaptada do EWRC.....	26
Tabela 2 – Número de folhas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,0; 1,2; 2,4; 3,6; 6,0 mL).	34
Tabela 3 – Altura de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,0; 1,2; 2,4; 3,6; 6,0 mL).	35
Tabela 4 – Área foliar de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,0; 1,2; 2,4; 3,6; 6,0 mL).	36
Tabela 5 – Número de folhas, altura e área foliar de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por capilaridade a 100 ppb de diquat.	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Espécies florestais.	24
--------------------------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

CO	Carbono Orgânico
DAA	Dias após a última aplicação
EPSPS	Enolpiruvil-shiquimato-3-fosfato sintase
EUA	Eficiência do uso da água
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MO	Matéria orgânica
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Policloreto de vinila
CO	Carbono Orgânico

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cm	Centímetro
CO ₂	Dióxido de carbono
g	Gramma
h	Horas
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	A AGRICULTURA E O USO DE PESTICIDAS	17
2.2	CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS.....	18
2.3	DINÂMICA DE HERBICIDAS NO AMBIENTE	19
2.4	AGRICULTURA E OS RISCOS PARA A CAATINGA.....	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1	CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....	23
3.2	DESIGN EXPERIMENTAL	24
3.2.1	Avaliação da sensibilidade de espécies florestais à contaminação por deriva do herbicida diquat.	24
3.2.2	Avaliação da sensibilidade de espécies florestais à contaminação de águas subsuperficiais pelo herbicida diquat.....	25
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
4.1	EFEITO DA DERIVA DE DIQUAT SOBRE ESPÉCIES ARBÓREAS.....	28
4.1.1	Intoxicação visual.....	28
4.1.2	Número de folhas, área foliar e altura de plantas	34
4.1.3	Matéria seca	38
4.2	EFEITO CONTAMINAÇÃO POR PERCOLAÇÃO DO DIQUAT SOBRE ESPÉCIES ARBÓREAS	42
5	CONCLUSÕES.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro e se destaca como uma das maiores áreas de clima semiárido no mundo (Moro et al., 2016), abrigando também uma população estimada em 28 milhões de habitantes (Ribeiro et al., 2016). Apesar de sua riqueza em biodiversidade e espécies endêmicas (Sobrinho et al., 2016), a Caatinga permanece entre os biomas menos explorados (Velloso et al., 2002; Santos et al., 2011), em parte devido ao enfoque predominante nos estudos direcionados para mapeamento de florestas densas e úmidas.

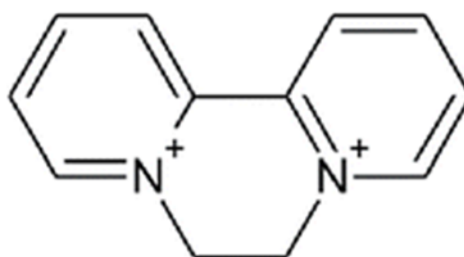
A má gestão dos recursos naturais tem sido um fator determinante no declínio de populações naturais, culminando, em alguns casos, na extinção de espécies (Kill et al., 2019). Este cenário pode ser ainda mais agravado por práticas agrícolas realizadas em proximidade a áreas de preservação, como a aplicação de pesticidas. A dispersão proveniente da pulverização desses produtos representa uma ameaça potencial considerável para ecossistemas terrestres e aquáticos, acarretando danos significativos. A deriva é um dos tipos de transporte de pesticidas mais comum e ocorre quando partículas do produto são transportadas pelo vento para áreas não destinadas, incluindo ecossistemas naturais e habitats de espécies nativas. Esse processo é um dos principais meios pelos quais as plantas nativas são inadvertidamente expostas a moléculas como de herbicidas, levantando sérias questões sobre os impactos ecológicos (Medeiros et al., 2023). Desta forma, a obtenção de informações sobre os impactos causados pela deriva de herbicidas é essencial para o conhecimento dos riscos e cuidados necessários no manuseio de tais produtos.

O herbicida paraquat, foi proibido no Brasil devido à sua elevada toxicidade para os seres humanos, e como substituto, o diquat emergiu como alternativa, por compartilhar algumas características semelhantes ao paraquat. O diquat, também pertencente ao grupo químico das bipiridílias, atuando como inibidor do fotossistema I (FSI) e demonstra maior eficácia no controle de dicotiledôneas (Silva et al., 2014). Este herbicida, de caráter não seletivo e de ação por contato, resulta no acúmulo espécies reativas de oxigênio, culminando na degradação das membranas celulares.

O diquat (Figura 1) é um herbicida amplamente utilizado no Brasil para controlar, principalmente, plantas daninhas em cultivos agrícolas (AGROFIT, 2023). O diquat é um herbicida não seletivo e utilizado como dessecante, sendo absorvido pela folhagem e com translocação limitada na presença de luz, podendo ocasionar danos nas estruturas celulares, interrupção do e a morte das plantas (Scholten et al., 2019). Quando entram em contato com as folhas das plantas, esse herbicida penetram e destroem a bicamada lipídica celular, resultando

na ruptura das membranas celulares. Em outras palavras, agem como desreguladores da membrana celular (Sherwani et al., 2015).

Figura 1 – Molécula do diquat.



Diquat

Fonte: Google Imagens

Apesar do diquat considerado um pouco menos tóxico a mamíferos do que o paraquat, ainda persiste uma preocupação quanto ao seu impacto ambiental devido à aplicação extensiva (Nisar et al., 2015). À medida que seu uso se disseminou, surgiram preocupações significativas sobre seus efeitos sobre espécies não-alvos, como espécies de plantas em áreas de preservação.

Os herbicidas também são frequentemente encontrados em águas subterrâneas e superficiais (Amoro, 2003). Isso ocorre devido ao transporte dos produtos por meio do escoamento superficial e da lixiviação. O comportamento do diquat no solo é complexo e influenciado por uma variedade de fatores, incluindo tipo de solo, umidade e condições climáticas. Sua capacidade de aderir a partículas de solo pode levar a uma persistência prolongada, tornando as áreas contaminadas um risco a longo prazo para a biodiversidade local. Embora as moléculas de diquat estejam fortemente ligados ao solo, especialmente por minerais argilosos, a sua mobilidade pode ser aumentada por aplicações de irrigação ou chuva (Tongur; Ayranci, 2021).

De maneira geral, o diquat pode ser considerado um produto tóxico para plantas, animais e insetos. Por exemplo organismos aquáticos, como peixes e invertebrados, mostraram-se altamente suscetíveis à contaminação por diquat (EFSA, 2015). A entrada desse herbicida nos corpos d'água pode causar efeitos devastadores nos ecossistemas aquáticos, prejudicando não apenas as plantas aquáticas, mas toda a cadeia alimentar aquática (Anderson; Marteinson; Prosser, 2021).

A compreensão completa dos efeitos do diquat sobre o ecossistema, em especial sobre as espécies nativas é desafiadora, especialmente quando se tratar de impactos de difícil mensuração. A exposição crônica a doses baixas do herbicida pode ter efeitos cumulativos,

cujas ramificações para a biodiversidade ainda são pouco estudadas. Diante dessas preocupações, surgem esforços para desenvolver medidas de mitigação e regulamentações mais rigorosas para o uso do diquat. A pesquisa científica e a conscientização pública desempenham papéis essenciais na formulação de políticas que protejam as espécies nativas e preservem a biodiversidade.

O conhecimento dos impactos negativos causados pelo diquat sobre espécies comuns do bioma da caatinga pode contribuir para a elaboração de políticas públicas e práticas culturais para evitar a contaminação indireta. Nesse sentido, a hipótese deste trabalho é de que as espécies arbóreas possuem sensibilidade diferente ao diquat quando expostas à contaminação via deriva ou por capilaridade (contaminação de águas subterrâneas rasas). Para testar essa hipótese, estabelecemos o seguinte objetivo geral: investigar a sensibilidade de espécies arbóreas expostas à contaminação por diquat via deriva simulada. E como objetivos específicos: i) determinar a sensibilidade dessas mesmas espécies à contaminação por diquat via absorção por capilaridade; ii) analisar o grau de sensibilidade entre os diferentes órgãos das plantas em resposta à contaminação por diquat.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A AGRICULTURA E O USO DE PESTICIDAS

A atividade agrícola abrange a produção de alimentos, desempenhando um papel crucial ao longo da história humana, inicialmente concentrando-se em terras férteis nos vales dos rios. Com o tempo, técnicas foram aprimoradas para aumentar a produtividade das culturas, visando um rendimento ampliado. À medida que a industrialização avançou e as cidades se fortaleceram, a agricultura passou a depender das técnicas industriais, estabelecendo uma interconexão vital entre os setores. Responsável pelo fornecimento de alimentos para populações rurais e urbanas, a agricultura desempenha um papel fundamental na alimentação global (Lima; de Assis; de Freitas, 2019).

A continuação do desempenho agrícola é um papel fundamental para garantir a segurança alimentar da população brasileira, fomentar o empreendimento de indústrias e manter a criação de empregos e aumento da renda. A agricultura representa uma parcela significativa dos empregos formais no Brasil, com 21% do total. No ano de 2022, a participação da agricultura no PIB foi de 24,8%, e suas exportações corresponderam a 47,6% do total exportado pelo país. Atualmente, o Brasil lidera a produção global de soja e figura como o quarto maior produtor de algodão. O país também ostenta o título de principal exportador mundial de carne bovina e suco de laranja, além de ocupar a segunda posição como maior exportador global de algodão. Até o início da década de 1970, a economia agrícola brasileira foi majoritariamente baseada no cultivo de café e cana-de-açúcar. Nessa época, o Brasil dependia em grande medida das orientações de alimentos básicos, como arroz, feijão, carnes e leite (Embrapa, 2023).

Devido a isso, a modernização se intensificou como um amplo processo de expansão do sistema capitalista. Sua base reside na supremacia da técnica sobre a natureza, à medida que a economia se globaliza em escala mundial. Esse processo é sustentado pela exploração dos recursos naturais e, ao perseguir um desenvolvimento excessivo, pode exercer pressão sobre os elementos naturais, causando problemas como abastecimento, escassez hídrica e degradação do solo e da vegetação (Porto Gonçalves, 2019).

Com o avanço da agricultura, foi necessário o uso de defensivos agrícolas no controle de pragas, doenças e plantas daninhas. Essas últimas demonstraram uma notável capacidade de se ajustar a uma ampla variedade de condições ambientais. Devido a essas características adaptativas, essas plantas são reconhecidas como um dos principais obstáculos à manutenção da produtividade das culturas agrícolas. Seu impacto na produção agrícola é significativo,

manifestando-se tanto por meio de efeitos diretos nas culturas, como a interferência substancial, quanto por efeitos indiretos, incluindo aumento dos custos de produção, complicações na colheita e queda da qualidade dos produtos. Além disso, essas plantas podem atuar como hospedeiras de pragas e doenças, garantindo a disseminação de problemas fitossanitários (de Oliveira; Karam; Matrangolo, 2015).

2.2 CONTROLE DE PLANTAS DANINHAS

As plantas daninhas são conceituadas como aquelas que interferem negativamente em uma determinada atividade humana. São plantas que potencial de impactar os cultivos agrícolas, reduzindo a produtividade (Silva et al., 2022). Além disso, apresentam outros efeitos adversos, como a desvalorização da terra, redução na qualidade dos produtos, ser hospedeiras de pragas e doenças, o que por sua vez aumenta a complexidade e os custos associados à gestão agrícola.

A interferência significativa causada pelas plantas daninhas nas áreas de cultivos requer a implementação de abordagens integradas de manejo. Essas estratégias abrangem métodos de controle preventivo, cultural, físico, mecânico, biológico e químico, buscando a plena expressão do potencial das culturas. Ainda que existam diversas alternativas de controle de plantas daninhas disponíveis, o método químico permanece como o mais utilizado entre os agricultores (Reis et al., 2019; Carneiro et al., 2020).

O uso de herbicidas tem sido objeto de intensos debates e estudos controlados por pesquisadores e especialistas. Sob uma perspectiva comercial, dada a globalização e forte competição no mercado interno e externo, torna-se competitivo e muito difícil sem a aplicação desses agentes de proteção agrícola (Takada, 2012).

Uma estratégia crucial para alcançar níveis elevados na cultura cultivada e reduzir a perpetuação de espécies de difícil controle é manter a cultura livre de competição, especialmente durante suas fases iniciais, conforme ressaltado por Rockenbach (2018) e Souza et al. (2020).

Durante um longo período, importantes herbicidas desempenharam um papel central no manejo químico de culturas comerciais. O paraquat e o glyphosate, por exemplo, figuram proeminentemente nessa lista. O paraquat, cujo nome químico é 1,1'-dimetil-4,4'-bipiridínio, foi lançado no mercado em 1962 pela Imperial Chemical Industries (ICI), também conhecida como Syngenta. Ele atua como um herbicida de contato, agindo como inibidor do FSI. Sua natureza não seletiva e sua classificação como bipiridílio conferem-lhe um amplo espectro de

ação, o que o torna eficaz de plantas daninhas de folhas largas e estreitas (Hallvass, 2019; Zobiole et al., 2019; Ribeiro, 2023; Barreto et al., 2017).

De acordo com Eddleston, M. (2016), dentro das numerosas categorias de pesticidas, os herbicidas bipiridílicos são particularmente notáveis devido à sua ampla aplicação. Estes consistem em compostos de amônio quaternário, conhecidos como "quats", que são comercializados como herbicidas de contato e dessecantes. As moléculas de paraquat (PQ) e diquat (DQ), objeto de estudo neste contexto, destacam-se como os principais representantes dessa família, exibindo considerável toxicidade.

Os compostos quaternários de amônio, como o diquat (DQT 2+), são atualmente empregados como herbicidas e dessecantes pós-emergência em diversas culturas (Pérez-Ruiz et al., 1994; Rytwo et al., 2004). Esses compostos exibem propriedades químicas e físicas notáveis, tais como elevada solubilidade em água e considerável potencial de ligação (Brian et al., 1958; Matolcsy et al., 1998). Em suas formas catiônicas, esses herbicidas são reconhecidos como tóxicos para os seres humanos (Reigart e Roberts, 1999) e são classificados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como moderadamente perigosos (Classe II). A contaminação de corpos d'água por esses compostos representa um desafio significativo, dada a sua fácil dissolução em meio aquoso devido à alta solubilidade em água mencionada anteriormente. Assim, torna-se imperativo desenvolver novas estratégias para a remoção eficaz desses compostos do ambiente aquático.

2.3 DINÂMICA DE HERBICIDAS NO AMBIENTE

Quanto os meios de transporte dos herbicidas no ambiente, conforme Borges (2020), a influência dos herbicidas é determinada pela interação entre propriedades físico-químicas, como características do solo e os atributos abióticos do local de aplicação. Essas propriedades, juntamente com os aspectos edáficos, influenciam a redistribuição e a degradação dos defensivos agrícolas. Entre as principais propriedades físicas-químicas dos herbicidas que desempenham um papel crucial nesses processos, destacam-se: a solubilidade em água (S_w), a pressão de vapor (PV), o coeficiente de octanol-água (K_{ow}), a constante de equilíbrio de ionização ácida (pK_a) e constante de Henry (H).

A solubilidade do herbicida desempenha um papel direto no transporte da molécula no ambiente. Em termos simples, quanto maior a solubilidade (S_w), maior a probabilidade de serem carregados por processos como lixiviação ou escoamento superficial, o que pode levar à contaminação de ecossistemas aquáticos (Correia, 2018). Por outro lado, a pressão de vapor

é uma característica que governa a capacidade de volatilização dos herbicidas. Condições de maior temperatura e baixa umidade tendem a acentuar o risco de volatilização, ampliando o espaço na atmosfera disponível para a evaporação (Schwartz et al., 2017).

O propósito da aplicação de um herbicida é assegurar que o produto alcance seu alvo desejado e seja absorvido pelas plantas daninhas em uma concentração suficientemente tóxica para controle necessário. Dessa forma, busca-se atingir a máxima eficácia de forma econômica, minimizando os riscos de contaminação ambiental e humana (Voll et al., 2010). Existem desafios enfrentados pelo produtor no campo, incluindo a perda potencial do produto devido a processos de deriva e volatilização (Ulisses, 2020).

Após a aplicação, é crucial avaliar as perdas de herbicida devido à volatilização e à derivação, a fim de compreender a exposição de organismos não-alvo ao produto. Uma análise das perdas para a atmosfera e os desafios associados a esse fenômeno tem sido objeto de estudo por diversos pesquisadores. (Gil; Sinforti, 2005; Santos, 2013; Schreiber et al., 2016; Tiburcio et al., 2012; Carvalho et al., 2014, Costa, 2019).

Quando se tratando dos impactos e efeitos no crescimento e desenvolvimento das plantas nas fases iniciais, o herbicida diquat (1-1'-etileno-2-2'-dibrometo de bipyridílio) a sua utilização tem sido direcionada no combate de *E. densa* e *H. verticillata*, fazendo com que ocorra na geração de radicais livres a captura de elétrons no fotossistema I. Esses radicais, por sua vez, desencadeiam o processo de transmissão lipídica, ocorreu na ruptura de membranas e consequente necrose dos tecidos (Dodge, 1991; Hess, 1993).

Essas substâncias, vindas de indústrias e da agricultura ou elementos radioativos, podem entrar em contato com os seres vivos de diferentes maneiras, como por exemplo: pelo ar, pelo contato direto com as mãos, pela ingestão etc. e desencadear uma série de doenças no corpo humano. Além disso podem afetar a vegetação e o solo (Vieira, 2021).

2.4 AGRICULTURA E OS RISCOS PARA A CAATINGA

A região do semiárido brasileiro é marcada principalmente pela presença de uma vegetação xerófito conhecida como "caatinga", que cobre uma parcela significativa de seu território. Este ecossistema único possui uma importância biológica substancial, pois suas espécies evoluíram com morfologias especializadas para prosperar em condições de escassez de água e altas temperaturas. Essa adaptabilidade apresenta perspectivas promissoras para o desenvolvimento da região. No entanto, a exploração inadequada desses recursos levou ao

declínio das populações naturais e, em alguns casos, à extinção de espécies específicas (Kill et al., 2019).

O semiárido brasileiro se destaca como a região mais árida do país, caracterizada por uma precipitação média anual de ≤ 800 mm/ano e marcada por uma variabilidade espacial e interanual extremamente alta na precipitação (Sá; Silva, 2010; Silva et al, 2017; Sudene, 2021). Ao lado de seus baixos valores pluviométricos, o clima semiárido também apresenta taxas mensais e anuais notavelmente altas de insolação e evatranspiração. A variabilidade interanual da precipitação é pronunciada, com estações secas e chuvosas distintas e períodos alternados de seca e umidade. Anos com chuvas abaixo da média e perto da média dominam o padrão (AB SABER, 2003; Lucena; Steinke, 2015).

. A Caatinga, um bioma exclusivamente brasileiro, destaca-se como uma das maiores áreas de clima semiárido no mundo (Moro et al., 2016), abrigando também uma densa população estimada em 28 milhões de habitantes (Ribeiro et al., 2016). Apesar de sua riqueza em biodiversidade e espécies endêmicas (Sobrinho et al., 2016), a Caatinga permanece entre os biomas menos explorados pela comunidade científica no Brasil (Velloso et al., 2002; Santos et al., 2011), em parte devido ao enfoque predominante nos estudos direcionados para mapeamento de florestas densas e úmidas. No entanto, este bioma enfrenta desafios consideráveis com o desmatamento e as queimadas, fatores que o tornam altamente vulnerável às mudanças climáticas.

A palavra "caatinga" tem origem na língua tupi-guarani e significa "mata branca", fazendo referência à aparência seca e esbranquiçada da paisagem durante o período de estiagem, quando as folhas caem (Albuquerque; Bandeira, 1995). Em uma perspectiva mais ampla, a Caatinga está inserida em um bioma global conhecido como florestas tropicais sazonalmente secas (Albuquerque et al., 2012; Brito; Presley; Santos, 2012), representando a maior e mais contínua extensão desse grupo na América do Sul (Santos et al., 2012).

A expansão dos pacotes tecnológicos na região brasileira resultou na rápida transformação dos biomas em um extenso depósito de resíduos provenientes de insumos agrícolas, pesticidas, herbicidas e uma diversidade de agrotóxicos aplicados sobre ele. (da Silva; da Fonseca; Machado, 2022).

A presença de espécies na fauna e na flora confere às áreas agrícolas uma série de benefícios ambientais ecológicos. Um exemplo é a polinização das flores, fundamental para garantir a frutificação e a produtividade das culturas, além de desempenhar um papel crucial no controle biológico de pragas e doenças (Leal et al., 2018). Além desses benefícios, essa diversidade também tem o efeito de atenuar o impacto das gotas de chuva sobre o solo,

promovendo maior infiltração de água e, conseqüentemente, favorecendo a recarga dos lençóis freáticos e satisfazendo a atração do terreno (Drumond et al., 2016).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Os experimentos foram realizados entre março e junho de 2023 em casa de vegetação na Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, situada em Mossoró, RN, Brasil (5° 03' 37" S 37° 23' 50" WGr). A amostra de solo utilizado nos experimentos foi coletada em uma área sem cultivo agrícola e não possuía histórico de aplicação de herbicidas. A coleta foi realizada até uma profundidade de 0 a 20 cm, sendo seca ao ar e peneirada através de uma malha de 2 mm. Essa amostra foi analisada química e fisicamente conforme descrita na metodologia proposta por Teixeira et al. (2017). Com base na análise granulométrica realizada, o solo apresentou proporções de areia, silte e argila de 0,86, 0,10 e 0,04 kg/kg, respectivamente, o que classifica sua textura como franco-arenosa. Quanto aos atributos químicos do solo, os seguintes valores foram obtidos: pH (H₂O) de 7,4; teor de matéria orgânica (MO) de 4,14 g kg⁻¹; condutividade elétrica (CE) de 0,22 dS/m; e capacidade de troca catiônica (CTC) de 5,48.

Foram realizados dois experimentos, sendo o primeiro resultante da avaliação da sensibilidade de quinze espécies florestais ao herbicida diquat, por efeito de deriva simulada. No segundo experimento as mesmas espécies foram avaliadas, contudo sob efeito do diquat diluído em águas subsuperficiais.

As espécies florestais escolhidas abrangem os biomas brasileiros do Cerrado e da Caatinga. As mudas foram adquiridas de um viveiro comercial da cidade de Mossoró. As espécies escolhidas para os dois experimentos estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1 – Espécies florestais.

Nome Científico	Nome Popular
<i>Amburana cearensis</i> AC Smith (<i>Fabaceae</i>)	Cumaru
<i>Aspidosperma pyrifolium</i> Mart. & Zucc.	Pereiro
<i>Bauhinia</i> spp. (diferentes espécies)	Mororó
<i>Ceiba glaziovii</i> (Kuntze) K.Schum.	Barriguda ou Paineira
<i>Cenostigma bracteosum</i>	Catingueira
<i>Enterolobium maximum</i> Ducke	Timbaúba
<i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	Ipê-Rosa e Ipê-Roxo
<i>Hymenaea courbaril</i> Linneaus	Jatobá
<i>Libidibia ferrea</i> Martius	Jucá
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth	Sabiá
<i>Mimosa tenuiflora</i>	Jurema Preta
<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	Turco
<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	Aroeira
<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso)	Caraibeira, Craibeira, Caraíba

Fonte: autoria própria, 2023.

3.2 DESIGN EXPERIMENTAL

3.2.1 Avaliação da sensibilidade de espécies florestais à contaminação por deriva do herbicida diquat.

O experimento foi realizado em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram arrançados em um esquema fatorial 15 x 5. O primeiro fator consistiu das 15 espécies florestais utilizadas. O segundo fator correspondeu às diferentes doses do herbicida diquat, sendo elas: testemunha sem herbicida (aplicação de água), 10% da dose comercial (0,24 g.i.a.ha-1), 20% da dose comercial (0,48 g.i.a.ha-1), 30% da dose comercial (0,72 g.i.a.ha-1) e 50% da dose comercial (1,2 g.i.a.ha-1) que correspondem também a 1,2, 2,4, 3,6 e 6,0 mL respectivamente do produto comercial Reglone®.

Cada unidade experimental consistiu em vasos de polietileno com capacidade de 5L, com uma muda. Os vasos foram preenchidos com um substrato composto por uma mistura de solo e esterco curtido na proporção de 10:1.

Após o solo ser colocado nos vasos, as mudas foram transplantadas, e a irrigação foi administrada manualmente. Antes de iniciar os tratamentos, as mudanças passaram por um período de aclimação de 30 dias. Após esse período, o herbicida foi aplicado utilizando um pulverizador costal de pesquisa pressurizado com CO₂ (Herbicat® - Catanduva, SP, Brasil). O equipamento de pulverização contém duas pontas do tipo plano Teejet XR 110.02, espaçadas a cada 50 cm, e operou sob uma pressão de 2,0 kgf cm². O sistema foi ajustado para aplicar um volume de 140 L por hectare. A barra de pulverização foi posicionada a uma distância de 50 cm das mudas.

3.2.2 Avaliação da sensibilidade de espécies florestais à contaminação de águas subsuperficiais pelo herbicida diquat.

O segundo experimento foi realizado em delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco repetições. Os tratamentos foram organizados em um esquema fatorial 2 x 15. O primeiro fator representou a presença ou ausência do herbicida diquat na água subsuperficial. Enquanto o segundo fator consistiu nas mesmas quinze espécies florestais utilizadas.

Para este experimento, foram empregadas colunas de PVC (policloreto de vinila) com um diâmetro de 100 mm e um comprimento de 35 cm, preenchidas com 5 kg de solo. Na parte externa inferior da coluna, foram posicionadas tampas de PVC com orifícios equidistantes para permitir a entrada de água no sistema. Entre a coluna e a tampa, foi adicionada uma camada de lã de vidro, a fim de evitar a perda de solo.

Uma estrutura destinada a fornecer a água necessária para a irrigação das mudas foi instalada na base das colunas. A estrutura com capacidade de (300 ml) foi revestida com um material opaco de cor branca para bloquear a passagem de luz com o intuito de diminuir a fotodegradação, simulando assim a presença do lençol freático. As mudas foram transplantadas e mantidas nesse sistema durante 20 dias para permitir um período de aclimação. A água foi fornecida exclusivamente através do subsolo, utilizando o processo de capilaridade. Sempre que se constatou a diminuição no volume de água, era reabastecido. Os valores referentes à quantidade de água foram registrados ao longo de todo o decorrer do experimento.

Após o período de aclimação, o herbicida diquat foi fornecido na porção inferior das estruturas dos sistemas. A aplicação do diquat ocorreu durante vinte dias consecutivos, passados os 20 dias após o transplante das mudas. Preparou-se uma solução contendo 100 ppb de diquat, considerando a dose comercial correspondente a 1,5 L de ingrediente ativo por hectare do herbicida Reglone®. Durante a aplicação, o volume de água contido no recipiente foi medido e, em seguida, complementado até atingir um total de 300 mL com água contendo diquat na concentração necessária para atingir a quantidade de 100 ppb do herbicida.

Os sintomas visuais de toxicidade das mudas foram avaliados aos 7, 14, 21, 28 e 35 DAA do diquat, seguindo a escala adaptada de FRANS (1972). (Tabela 1).

Tabela 1 – Conceitos atribuídos à toxicidade de herbicidas, segundo a escala adaptada do EWRC.

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

Fonte: FRANS (1972).

Aos 35 dias após a aplicação (DAA), a área foliar e a massa fresca das espécies foram mensuradas. As folhas foram coletadas e dispostas individualmente sobre papel cartolina (50 cm x 66 cm), garantindo a ausência de sobreposição entre as folhas das mudas. Foram capturadas imagens fotográficas e, em seguida, as imagens foram processadas digitalmente utilizando o software ImageJ (Instituto Nacional de Saúde, NY, EUA). Posteriormente, os caules e as raízes foram coletados separadamente. As folhas, caules e raízes foram pesadas utilizando uma balança de precisão (Bel®, modelo S2202H, Piracicaba, SP, Brasil) para a obtenção das massas frescas.

As amostras de folhas, caules e raízes foram acondicionadas em sacos de papel e permaneceram à secagem em uma estufa de circulação de ar forçada a uma temperatura média de 60 °C até alcançarem peso constante. Após essa etapa, o material foi pesado usando uma balança semi-analítica digital (Marte®, modelo AD500, São Paulo, SP, Brasil) para obtenção das massas secas.

As avaliações incluíram a medição do número de folhas, altura e área foliar das mudas. Esses parâmetros são indicativos do impacto do herbicida diquat nas características morfológicas e no desenvolvimento das plantas estudadas.

Para o ensaio de capilaridade os resultados foram obtidos pela média de cinco repetições, enquanto no ensaio de deriva foi considerada a média de três repetições de todos os parâmetros avaliados. Todos os conjuntos de dados foram testados quanto à normalidade (teste de Shapiro-Wilk) antes de realizar uma análise de variância (ANOVA) e verificar a interação entre os fatores. Quando o valor de F foi significativo as médias foram comparadas pelo teste Tukey ($p < 0,05$). As análises estatísticas foram realizadas no software RStudio (versão 2023.06.1+524).

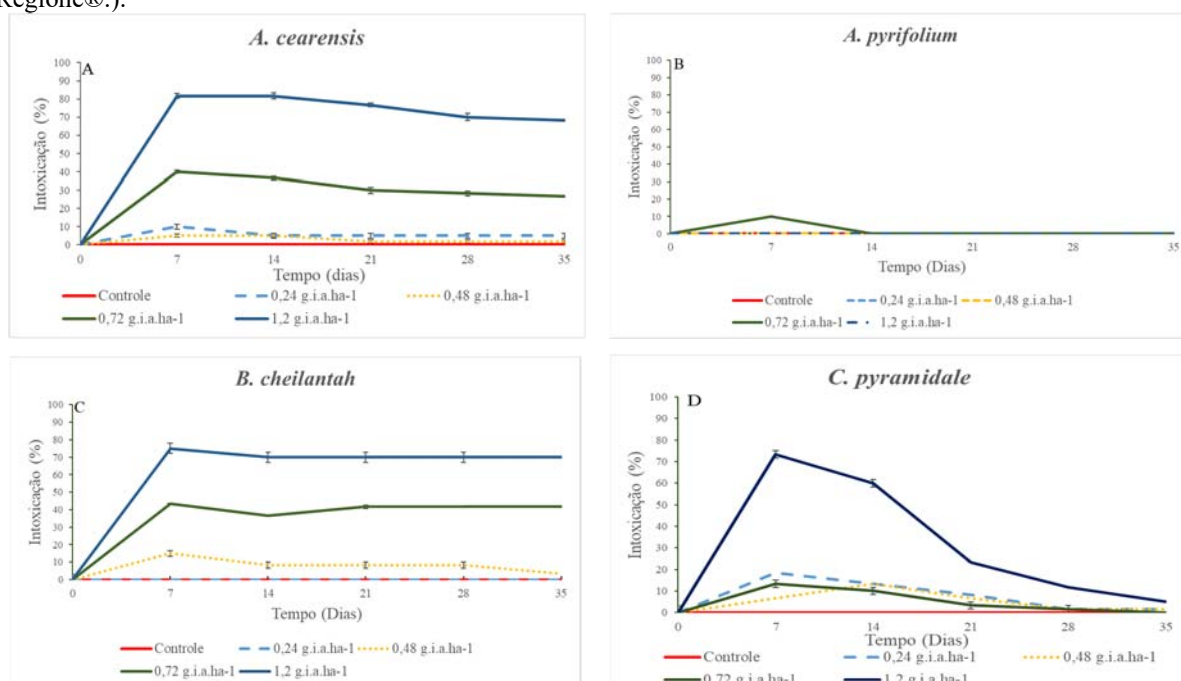
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

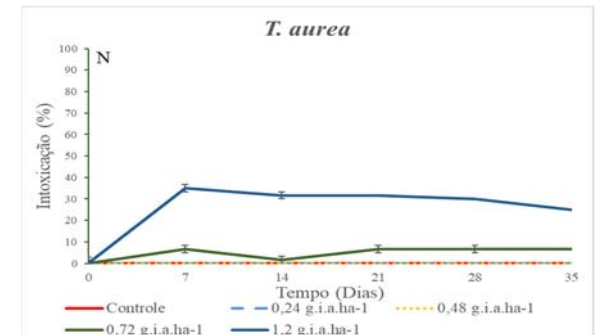
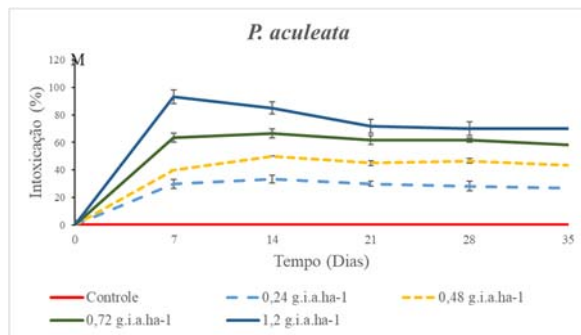
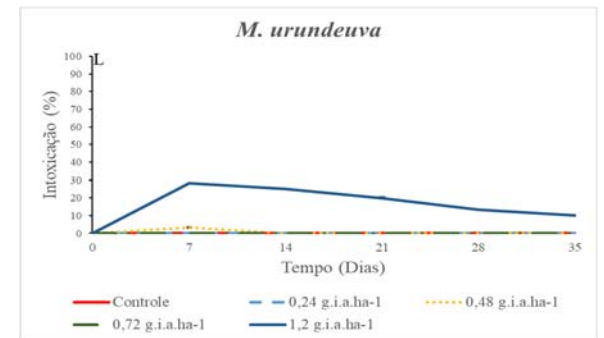
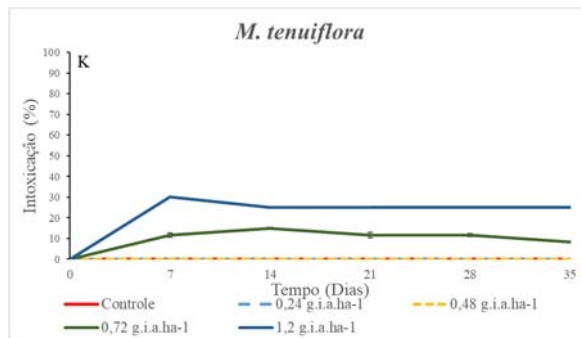
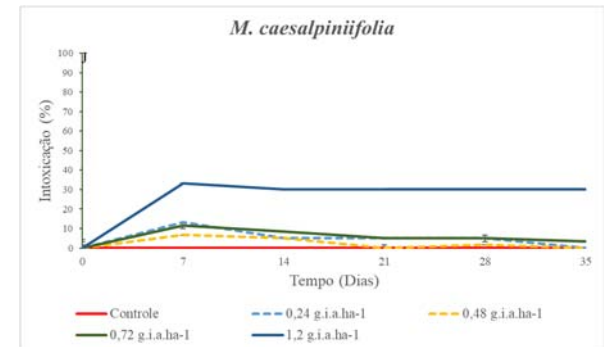
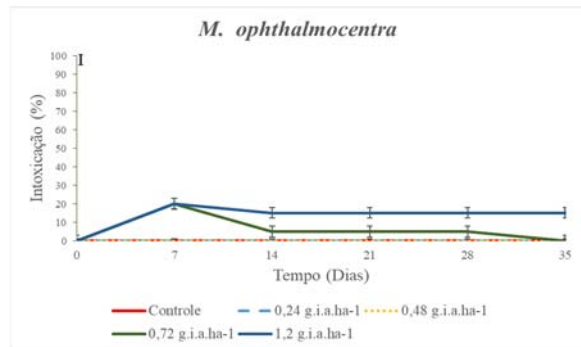
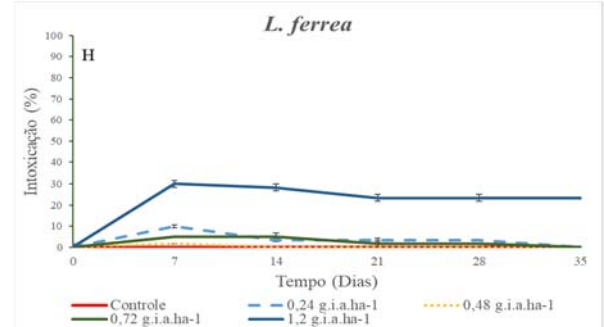
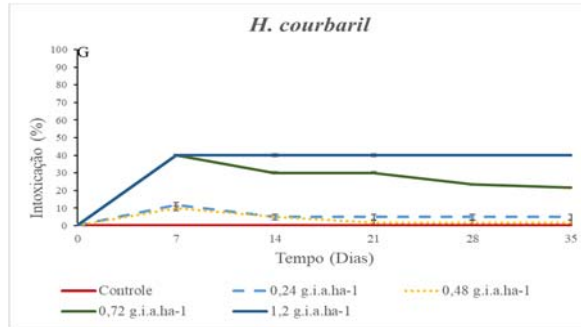
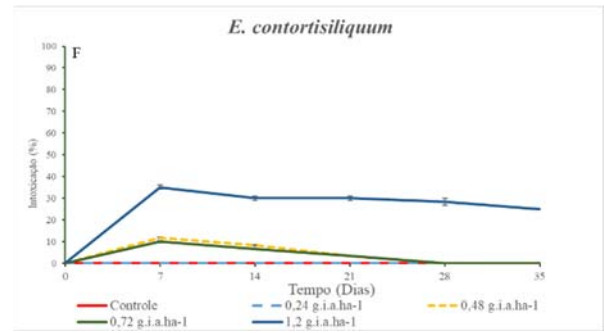
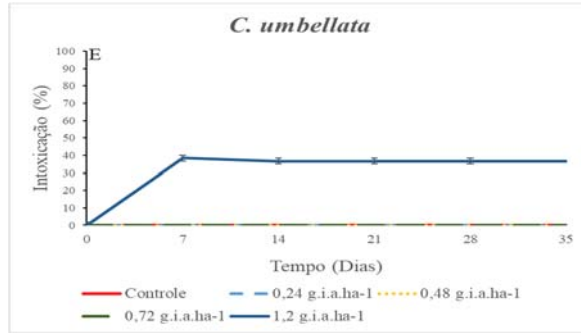
4.1 EFEITO DA DERIVA DE DIQUAT SOBRE ESPÉCIES ARBÓREAS

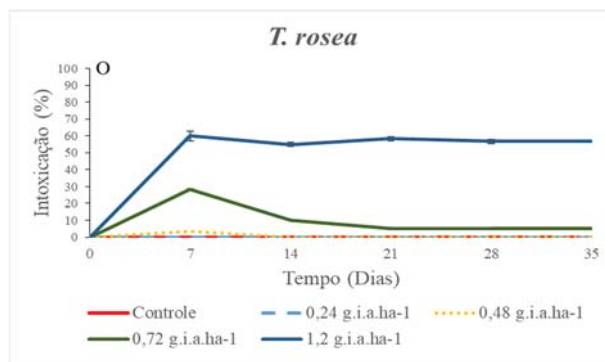
4.1.1 Intoxicação visual

As mudas das espécies florestais tiveram níveis de intoxicação visual diferentes após terem sido expostas à contaminação pelo diquat no método por deriva. Nas espécies mais suscetíveis, observaram-se sintomas distintivos, como o surgimento inicial de clorose, seguido pela ocorrência de necrose parcial nas folhas. A queda das folhas manifestou-se como um sintoma em algumas das espécies, e esta observação será abordada de forma mais detalhada. Os herbicidas que afetam o sistema de fotossíntese, nessa circunstância no FSI, as plantas podem induzir sintomas visíveis em um curto período, geralmente dentro de 1 a 2 horas após a aplicação (Hess, 2000). O primeiro sinal desses efeitos se assemelha à folhagem adquirindo uma aparência úmida, que é resultado da interferência da membrana plasmática das células, permitindo o vazamento do conteúdo celular para os espaços intercelulares. Após aproximadamente dois dias, essa manipulação da membrana leva à necrose das áreas afetadas devido à dessecação dos tecidos (Hess, 2000).

Figura 2 – Intoxicação visual em mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro dias após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,24 g.i.a.ha-1), (0,48 g.i.a.ha-1), (0,72 g.i.a.ha-1) e () do Reglone®).







Todos os dados são apresentados como média $\pm$ desvio padrão (n = 4)
 Fonte: autoria própria, 2023.

Com base na porcentagem de danos descritos na Tabela 1, verificou-se que as espécies *Amburana cearensi*, *Aspidosperma pyrifolium*, *Bauhinia cheilantha*, *Ceiba glaziovii*, *Cenostigma bracteosum*, *Handroanthus heptaphyllus*, *Hymenaea courbaril*, *Libidibia férrea*, *Mimosa caesalpiniiifolia*, *Mimosa tenuiflora*, *Parkinsonia aculeata*, *Piptadenia retusa*, *Schinus terebinthifolius* e *Tabebuia aurea* submetidas à deriva de diquat apresentaram variações de intoxicação entre as doses diquat (0,24 g.i.a.ha-1), (0,48 g.i.a.ha-1), (0,72 g.i.a.ha-1) e (1,2 g.i.a.ha-1) do Reglone®., equivalente a 10, 20, 30 e 50%, respectivamente e entre as épocas de avaliação: 7, 14, 21, 28 e 35 DAA (Figura 2).

A variação na intensidade de intoxicação observada entre as diferentes espécies e doses pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a sensibilidade específica de cada planta ao diquat, a capacidade de metabolização e desintoxicação das substâncias químicas pela planta e a fase de desenvolvimento em que as plantas se encontraram no momento da exposição.

Além disso, a variação nos efeitos ao longo do tempo (diferentes DAA) pode estar relacionada à dinâmica de absorção, translocação e metabolização do diquat nas plantas. Algumas plantas podem apresentar sinais de intoxicação mais rapidamente do que outras, ou podem se recuperar ao longo do tempo devido a mecanismos de defesa naturais. A sobrevivência das plantas em ambientes adversos é viabilizada por diversas adaptações, sendo a cutícula e os estômatos os elementos preponderantes na manutenção do equilíbrio hídrico foliar. Juntos, são característicos um sistema integrado de funções estruturais e fisiológicas que otimizam tanto a atividade fotossintética quanto as trocas gasosas de forma global (Oliveira; Meirelles; Salatino, 2003; Riederer; Schreiber, 2001).

A espécie *A. cearensis* exibiu sintomas de intoxicação acima de 80% aos 7 e 14 DAA, 75% aos 21 DAA e 70% aos 28 e 35 DAA, considerando a dose de 6,0 mL. A dose de 3,6 mL proporcionou aproximadamente 40% de intoxicação aos 7 DAA, com leve recuperação nas

avaliações realizadas aos 14, 21, 28 e 35 DAA. As doses de 1,2 e 2,4 mL causaram sintomas leves, inferior a 10% de intoxicação.

A. pyrifolium manifestou leve sintoma de intoxicação, em torno de 10%, apenas aos 7 DAA quando usada a dose de 3,6 mL, com ausência de sintomas quando submetidas aos demais tratamentos (doses de 1,2, 2,4 e 6,0 mL), considerando todas as épocas avaliadas.

L. ferrea exibiu 10% de intoxicação na dose de 1,2 mL aos 7 DAA, com tendência ao desaparecimento dos sintomas nas demais épocas testadas. A dose de 2,4 mL não causou nenhuma intoxicação em todas as épocas avaliadas. A dose de 3,6 mL causou 5% de intoxicação aos 7 e 14 DAA, com desaparecimento dos sintomas de intoxicação nas avaliações realizadas aos 21, 28 e 35 DAA. A dose de 6 mL proporcionou 30% de intoxicação aos 7 DAA, 25% aos 14 DAA e 20% aos 21, 28 e 35 DAA. A *H. courbaril* apresentou 10% de intoxicação aos 7 DAA para as doses de 1,2 e 2,4 mL, com redução dos sintomas nas demais épocas avaliadas. A dose de 3,6 mL proporcionou 40% de intoxicação aos 7 DAA, 30% aos 14 e 21 DAA e 20% aos 28 e 35 DAA. Já a dose de 6 mL resultou em 40% de intoxicação para todas as épocas avaliadas. *M. ophthalmocentra* não apresentou sintomas quando utilizadas as doses de 1,2 e 2,4 mL de diquat em todas as épocas avaliadas. A dose de 3,6 mL causou 20% de intoxicação aos 7 DAA e em torno de 5% nas demais épocas avaliadas. A dose de 6 mL proporcionou 20% de intoxicação aos 7 DAA, 15% aos 14, 21, 28 e 35 DAA do diquat. A presença de uma cutícula espessa e a deposição de cera epicuticular nas células da epiderme de *A. pyrifolium*, *L. ferrea*, *H. courbaril* e a *M. ophthalmocentra*, contribuíram para a redução da intoxicação causada pelo diquat, possivelmente devido à menor absorção do herbicida. A primeira linha de defesa contra a absorção de herbicidas hidrofílicos, como o diquat, é representada pela cera cuticular (Holloway, 1993; Hess et al., 2000; Cruz-Hipolito et al., 2011; Singh et al., 2011).

Em espécies amplamente presentes no cerrado e na caatinga, o acúmulo de cera cuticular representa uma estratégia eficaz para minimizar a perda de água (Dória et al., 2016). Como resultado dessa característica anatômica foliar, a absorção do diquat foi dificultada. No entanto, é importante observar que a barreira cuticular não conseguiu prevenir a intoxicação das espécies *A. cearenses*, quando aplicada a dose maior.

A cutícula consiste em uma membrana composta por uma matriz insolúvel de polímeros, como a cutina, associada a lipídeos solventes-solúveis, conhecidos como ceras cuticulares. Essas ceras são subdivididas em cera epicuticular, que recobre a superfície externa, e cera intracuticular, que fica imersa na matriz de cutina (Leide et al., 2011). Tanto a composição química quanto a configuração das ceras na superfície das folhas desempenham um papel crucial na compreensão da interação da planta com seu ambiente, seja ele biótico ou abiótico.

Isso influencia diretamente a fisiologia específica da planta e suas funções ecológicas (Maarseveen; Jetter, 2009; Yin et al., 2011).

B. cheilantha não apresentou sintomas de intoxicação para a dose de 1,2 mL em todas as épocas avaliadas. A dose de 2,4 mL causou 15% de intoxicação aos 7 DAA, com leve redução dos sintomas nas demais épocas avaliadas. A dose de 3,6 mL causou aproximadamente 40% de intoxicação em todas as épocas avaliadas. A dose de 6,0 mL proporcionou em torno de 70% de intoxicação em todas as épocas avaliadas.

C. pyramidale apresentou 75% de intoxicação quando expostas a dose de 6 mL aos 7 DAA, com acentuada recuperação nas demais épocas avaliadas. Para as demais doses, foram observados leves sintomas nas primeiras épocas de avaliação, com desaparecimento dos sintomas nas últimas épocas avaliadas.

C. umbrellata apresentou em torno de 40% de intoxicação em todas as épocas avaliadas, quando submetidas a dose de 6 mL. Para as demais doses testadas foi observada ausência de sintomas de intoxicação para esta espécie.

E. contortisiliquum apresentou ausência de sintomas quando submetida a dose de 1,2 mL, 10% de intoxicação aos 7 DAA para as doses de 2,4 e 3,6 mL, com desaparecimento dos sintomas nas épocas subsequentes. A dose de 6 mL proporcionou 35% de intoxicação aos 7 DAA e 30% de intoxicação nas demais épocas avaliadas dentre as espécies nativas do bioma cerrado e da caatinga avaliadas aqui e que apresentaram elevada sensibilidade ao diquat, *E. contortisiliquum* já foi documentada como uma planta suscetível a herbicidas com mecanismos de ação semelhantes ao diquat. Monquero et al. (2011) relataram uma intoxicação significativa em *E. contortisiliquum* quando exposta a doses mais elevadas do herbicida.

M. caesalpinifolia apresentou 12% de intoxicação aos 7 DAA, 5% aos 14, 21 e 28 DAA e ausência de sintomas aos 35 DAA para a dose de 1,2 mL. Quando submetidas a dose de 2,4 mL as mudas apresentaram 8% de intoxicação aos 7 DAA, 5% aos 14 DAA e ausência de sintomas aos 21, 28 e 35 DAA. A dose de 3,6 mL propiciou 11% de intoxicação aos 7 DAA, 9% aos 14 DAA, 5% aos 21, 28 e 35% do diquat. A dose de 6 mL possibilitou 35% de intoxicação aos 7 DAA e 30% aos 14, 21, 28 e 35 DAA.

M. tenuiflora apresentou sintomas de intoxicação apenas quando expostas as doses de 3,6 e 6 mL de diquat. A dose de 3,6 mL causou intoxicação de 10% para as épocas de 7, 14, 21, 28 e 35 DAA, respectivamente. Já a dose de 6 mL causou intoxicação de 30% aos 7 DAA e 25% aos 7, 14, 21, 28 e 35 DAA, respectivamente. De acordo com Borges (2020), esta espécie demonstrou sensibilidade à intoxicação pelo glifosato, e os resultados indicam uma resposta significativa também ao diquat.

M. urundeuva apresentou leves sintomas de intoxicação aos 7 DAA, quando utilizada a dose de 2,4 mL. A dose 6 mL propiciou 28% de intoxicação aos 7 DAA, 25% aos 14 DAA, 20% aos 21 DAA, 10% aos 28 DAA e 8% aos 35 DAA.

P. aculeata apresentou sintomas crescentes de intoxicação a medida que aumentou as doses aplicadas. A dose de 1,2 mL provocou 28%, 30%, 25% e 20% de intoxicação as 7, 14, 21, 28 e 35 DAA, respectivamente. A dose de 2,4 mL causou 48, 50, 40,42 e 38% de intoxicação aos 7, 14, 21, 28 e 35 DAA, respectivamente. A dose de 3,6 mL proporcionou aproximadamente 60% de intoxicação em todas as épocas avaliadas. A dose de 6 mL causou 95% de intoxicação aos 7 DAA, 90% aos 14 DAA e 70% aos 21, 28 e 35 DAA do diquat.

T. aurea apresentou sintomas para as maiores doses avaliadas (3,6 e 6 mL). A dose de 3,6 mL propiciou sintomas de intoxicação inferiores a 10% aos 7, 21, 28 e 35 DAA. A dose de 6 mL causou 35% de sintomas aos 7 DAA, 30% aos 14, 21 e 28 DAA e 25% aos 35 DAA. *T. rosea* exibiu 30% de intoxicação aos 7 DAA, 8% aos 14 DAA e 5% aos 21, 28 e 35 DAA, quando expostas a dose de 3,6 mL. Já quando expostas a dose de 6 mL as mudas manifestaram em torno de 55 – 60% de intoxicação para todas as épocas avaliadas. Estudos prévios têm evidenciado que a casca e as folhas da *T. aurea*, e a *T. rosea* conhecida como caraibeira, são tradicionalmente empregadas em usos medicinais, destacando-se como depurativo, o qual implica na purificação do organismo de suas toxinas e resíduos, conforme descrito por (Machado e Pereira em 1985). Além disso, a planta exibe propriedades febrífugas, sendo capaz de reduzir a febre. De acordo com relatos de Pereira em 2003, tanto a entrecasca quanto as folhas são utilizadas na preparação de um xarope destinado ao tratamento de afecções como gripes, resfriados, bronquites e tosse, além de processos inflamatórios. A singularidade dessas propriedades pode sugerir uma possível resistência da planta ao herbicida diquat.

Os resultados observados no experimento indicaram que a resposta das diferentes espécies florestais ao herbicida Diquat varia significativamente. Vários fatores podem influenciar essas diferenças de resposta, as plantas apresentam variabilidade natural em sua tolerância a herbicidas. Algumas espécies podem ser mais sensíveis, enquanto outras são mais resistentes. A escolha de uma ampla variedade de espécies florestais no experimento contribuíram para a diversidade de respostas observadas. A variação nas doses do herbicida Diquat pode explicar as diferentes respostas observadas em diferentes espécies. Espécies que apresentam sintomas mais graves podem ser mais suscetíveis ao Diquat em doses mais altas, enquanto outras podem ser mais tolerantes ou ter uma resposta mais gradual. Cada espécie tem características únicas em termos de metabolismo, estrutura foliar e capacidade de regeneração, o que pode influenciar sua resposta ao herbicida

4.1.2 Número de folhas, área foliar e altura de plantas

As espécies *A. cearensis* *B. cheilanth* *C. pyramidale* *C. guarda-chuvata* *E. contortisiliquum* *H. courbaril* *L. ferrea* *M. oftalmocentra* *M. caesalpiniifolia* *M. urundeuva* *P. aculeata*, *T. aurea*, e *T. rosea*, não tiveram o número de folhas alterado após a exposição a diferentes níveis de diquat (Tabela 2).

Tabela 2 – Número de folhas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,24 g.i.a.ha⁻¹), (0,48 g.i.a.ha⁻¹), (0,72 g.i.a.ha⁻¹) e (1,2 g.i.a.ha⁻¹) do Reglone®.

Espécies	Doses (g.i.a.ha ⁻¹)				
	0	0,24	0,48	0,72	1,2
<i>A. cearensis</i>	6,67 a	8,00 a	6,67 a	7,67 a	5,00 a
<i>A. pyrifolium</i>	5,33 c	3,00 c	7,33 b	12,67 a	5,00 c
<i>B. cheilantha</i>	11,00 a	13,33 a	12,33 a	11,00 a	10,66 a
<i>C. pyramidale</i>	14,04 a	10,33 a	7,33 a	11,33 a	9,00 a
<i>C. umbrellata</i>	18,33 a	16,67 a	17,67 a	19,33 a	14,33 a
<i>E. contortisiliquum</i>	17,33 a	15,66 a	16,66 a	15,00 a	15,33 a
<i>H. courbaril</i>	5,33 a	4,67 a	6,00 a	7,67 a	5,00 a
<i>L. ferrea</i>	23,67 a	18,00 a	17,67 a	18,67 a	19,00 a
<i>M. ophthalmocentra</i>	20,33 a	22,00 a	21,00 a	20,67 a	16,00 a
<i>M. caesalpiniifolia</i>	13,00 a	12,67 a	9,00 a	10,00 a	11,33 a
<i>M. tenuiflora</i>	26,00 b	21,00 c	34,66 a	27,33 b	34,33 a
<i>M. urundeuva</i>	14,00 a	15,00 a	14,33 a	11,67 a	12,67 a
<i>P. aculeata</i>	27,33 a	25,33 a	25,00 a	21,33 a	26,66 a
<i>T. aurea</i>	17,67 a	17,00 a	16,33 a	17,33 a	20,67 a
<i>T. rosea</i>	15,00 a	16,00 a	16,67 a	16,33 a	13,33 a
C.V. (%)	20,68				

*Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0,05$).

Fonte: autoria própria, 2023.

Os resultados apontam que, entre as espécies examinadas, apenas *A. pyrifolium* e *M. tenuiflora* apresentaram variações significativas no número de folhas em resposta à exposição ao herbicida diquat. Essa constatação sugere que essas duas espécies possam ser mais sensíveis ou suscetíveis aos efeitos do diquat em comparação com outras variedades testadas no experimento. Foi notado que, no grupo controle e na menor dose de 1,2 ml, não houve diferença

no número de folhas para a espécie; entretanto, nas plantas expostas às doses de 2,4 ml e 3,4 ml, houve um aumento significativo, enquanto na dose de 6 ml o valor diminuiu abruptamente. No entanto, não existem estudos na literatura que abordem os efeitos específicos da deriva do diquat na intoxicação de algumas plantas. A literatura existente discute o comportamento das espécies quando submetidas ao estresse provocado por herbicidas.

O crescimento retardado das plantas e a redução da produtividade podem ser empregados como critérios para avaliar e quantificar a influência de substâncias tóxicas nas plantas, conforme observado por Santos et al. (2005). As respostas mais positivas dos aminoácidos geralmente ocorrem em situações de estresses bióticos, como ataques de pragas, e estresses associados à aplicação de defensivos, especialmente herbicidas. Essa característica confere aos aminoácidos a denominação de agentes antiestressantes, conforme discutido por Zobióle et al. (2010).

É importante compreender a diversidade de respostas das espécies nativas do Nordeste brasileiro ao herbicida, fornecendo entendimentos importantes para práticas de manejo e conservação ambiental na região.

Tabela 3 – Altura de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,24 g.i.a.ha⁻¹), (0,48 g.i.a.ha⁻¹), (0,72 g.i.a.ha⁻¹) e (1,2 g.i.a.ha⁻¹) do Reglone®).

Espécies	Doses (g.i.a.ha ⁻¹)				
	0	0,24	0,48	0,72	1,2
	-----cm-----				

<i>A. cearensis</i>	22,00 a	27,00 a	21,67 a	29,33 a	16,33 a
<i>A. pyrifolium</i>	21,33 a	17,67 a	21,00 a	24,00 a	13,33 a
<i>B. cheilantah</i>	34,33 a	40,67 a	32,67 a	29,33 a	31,33 a
<i>C. pyramidale</i>	33,33 a	37,00 a	26,67 a	27,67 a	38,00 a
<i>C. umbrellata</i>	57,67 a	55,00 a	58,00 a	61,67 a	55,33 a
<i>E. contortisiliquum</i>	61,33 a	61,33 a	68,33 a	70,67 a	50,67 a
<i>H. courbaril</i>	26,33 a	24,67 a	26,00 a	30,00 a	18,67 a
<i>L. ferrea</i>	89,00 a	57,00 c	69,33 b	72,00 b	61,33 c
<i>M. ophthalmocentra</i>	93,00 a	99,00 a	106,00 a	96,67 a	99,67 a
<i>M. caesalpiniiifolia</i>	45,67 a	49,67 a	47,00 a	46,33 a	44,33 a
<i>M. tenuiflora</i>	86,50 a	60,33 c	69,50 b	72,66 b	67,00 b
<i>M. urundeuva</i>	52,33 a	41,33 a	45,00 a	39,00 a	48,00 a

<i>P. aculeata</i>	75,00 a	74,67 a	68,67 a	73,00 a	66,00 a
<i>T. aurea</i>	38,67 b	79,33 a	34,67 b	27,00 b	41,00 b
<i>T. rosea</i>	46,33 a	50,33 a	36,67 a	38,67 a	31,67 a
C.V. (%)	19,25				

*Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0,05$).

Fonte: autoria própria, 2023.

Os resultados ressaltam que, dentre as espécies examinadas, apenas *L. ferrea*, *M. tenuiflora* e *T. aurea* apresentaram variações na altura das mudas em resposta à exposição ao herbicida diquat. Essas observações indicam que essas três espécies podem ser mais sensíveis ou suscetíveis aos efeitos do diquat em comparação com outras espécies avaliadas no estudo.

L. ferrea, por exemplo, alcançou uma altura de 57,00 cm na dose mais baixa de 1,2 ml, apresentando uma diferença significativa em comparação com o grupo controle. Nas doses de 2,4 ml e 3,6 ml, não foram identificadas diferenças significativas, sugerindo um comportamento semelhante da espécie nessas duas doses. Contudo, na dose mais elevada, a espécie teve seu crescimento reduzido. Similarmente, *M. tenuiflora* atingiu uma altura de 60,33 cm na dose de 1,2 ml, apresentando uma diferença significativa em relação ao controle. Nas demais doses de 2,4 ml, 3,6 ml e 6,0 ml, não foram observadas diferenças significativas, indicando um crescimento médio da espécie. *T. aurea* demonstrou um padrão comportamental semelhante.

Esses resultados sugerem a possibilidade de desativação ou superação de algum mecanismo de defesa das espécies diante da exposição ao diquat. As plantas desenvolveram mecanismos de defesa, nos quais cada célula possui capacidade tanto de defesa induzida quanto pré-formada. Contudo, o uso de herbicidas pode interferir nesses mecanismos, impactando a altura, o número de folhas e o comprimento das raízes (Rizzardi et al., 2003).

Tabela 4 – Área foliar de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por deriva a diferentes concentrações do herbicida diquat (0,24 g.i.a.ha⁻¹), (0,48 g.i.a.ha⁻¹), (0,72 g.i.a.ha⁻¹) e (1,2 g.i.a.ha⁻¹) do Reglone®).

Espécies	Doses (g.i.a.ha-1)				
	0	0,24	0,48	0,72	1,2
	-----cm ² -----				

<i>A. cearensis</i>	127,62 b*	175,95 a	139,85 b	78,81 c	19,60 d
<i>A. pyrifolium</i>	45,09 a	34,67 a	52,57 a	154,73 a	72,07 a
<i>B. cheilantah</i>	540,86 a	440,83 a	480,72 a	597,16 a	510,62 a

<i>C. pyramidale</i>	1092,88 a	917,18 b	1107,05 b	1098,86 a	599,85 c
<i>C. umbrellata</i>	820,48 a	592,52 a	684,69 a	818,33 a	837,59 a
<i>E. contortisiliquum</i>	1528,15 a	1410,46 a	1370,87 a	884,80 b	725,86 b
<i>H. courbaril</i>	162,07 a	179,29 a	206,52 a	234,98 a	206,28 b
<i>L. ferrea</i>	937,67 a	787,11 a	662,59 a	723,67 a	878,41 a
<i>M. ophthalmocentra</i>	638,28 a	727,32 a	817,47 a	483,50 a	480,76 a
<i>M. caesalpiniiifolia</i>	1025,90 a	967,28 a	1206,01 a	887,71 a	468,79 c
<i>M. tenuiflora</i>	698,29 a	612,73 a	562,68 a	539,65 a	371,15 a
<i>M. urundeuva</i>	816,94 a	799,17 a	651,88 a	558,60 a	789,51 a
<i>P. aculeata</i>	1528,15 a	1410,47 a	1370,87 a	884,80 a	725,87 a
<i>T. aurea</i>	717,62 b	710,94b a	705,05 b	538,49 c	1034,13 a
<i>T. rosea</i>	969,58 a	951,91 a	1013,46 a	1001,67 a	883,41 a
C.V. (%)	26,69				

*Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0,05$).

Fonte: autoria própria, 2023.

Apenas as espécies *A. Cearensis*, *C. pyramidale*, *E. contortisiliquum*, *H. courbaril* e *T. aurea* demonstraram respostas significativas em relação à área foliar de mudas após a exposição por deriva a diversas concentrações do herbicida diquat. Esses resultados indicam uma variabilidade de sensibilidade entre as espécies em relação à deriva a diferentes concentrações do diquat. Por outro lado, as demais espécies não apresentaram respostas significativas, sugerindo possível resistência ou insensibilidade ao defensivo agrícola. Essa discrepância nas respostas é essencial para compreender a diversidade na tolerância das diferentes espécies aos efeitos do herbicida.

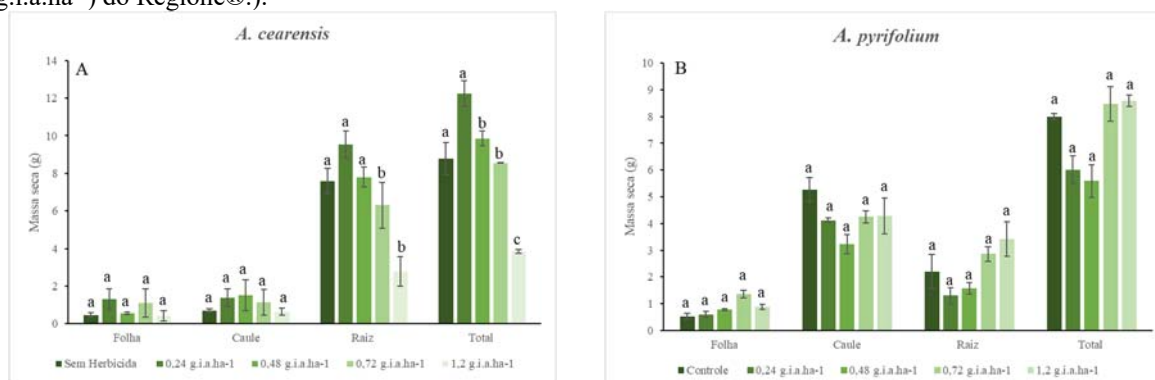
A aplicação direta sob as folhas parece ter provocado a redução mais expressiva no crescimento desse órgão em muitas espécies arbóreas. No entanto, é importante considerar que outros fatores podem contribuir para esse comportamento. O Diquat é amplamente recomendado para dessecação eficiente em folhas largas (Sousa, U. V. de et al.). O herbicida atua de forma rápida na folha, comprometendo a permeabilidade da membrana celular e resultando na perda de água, ocasionando desidratação e levando as folhas a secarem em poucos dias (Barbosa et al., 2019). O mecanismo de ação do Diquat, relacionado à captura de elétrons, assemelha-se ao da ferredoxina. Esses herbicidas capturam elétrons provenientes da fotossíntese e respiração, gerando radicais tóxicos. Importante ressaltar que esses radicais livres não são os causadores dos sintomas de fitotoxicidade, uma vez que são instáveis e passam por

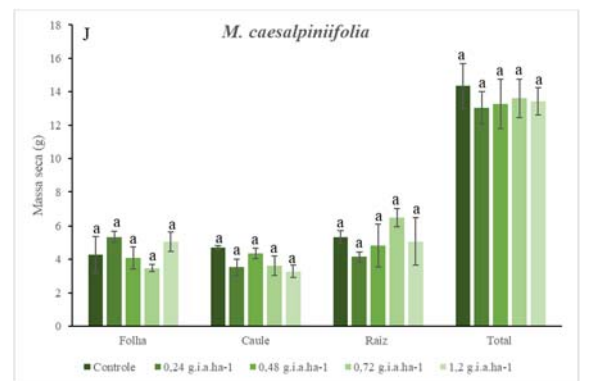
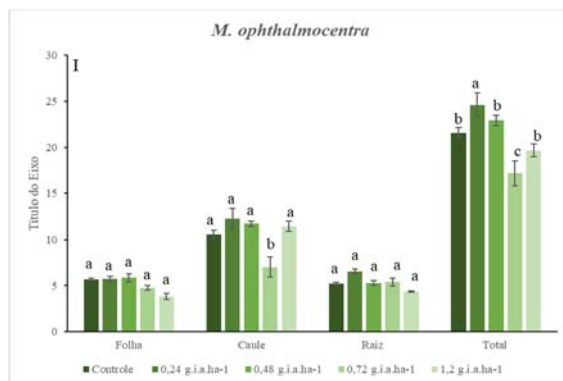
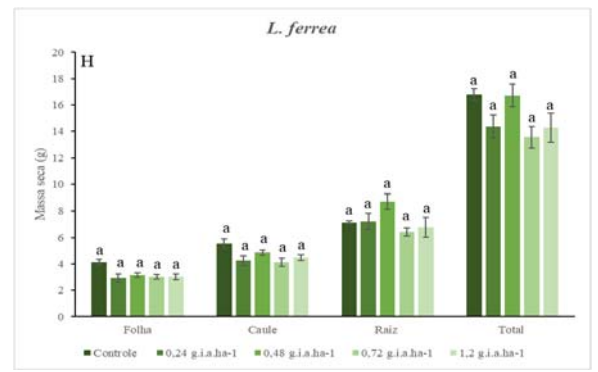
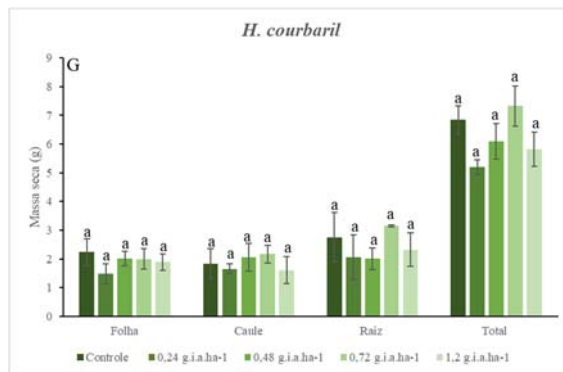
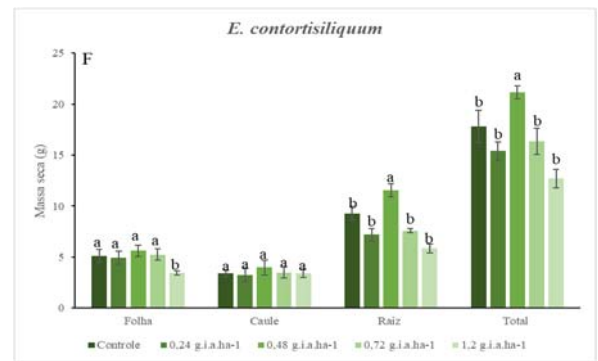
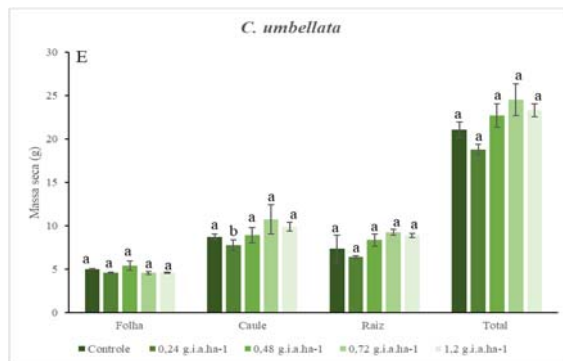
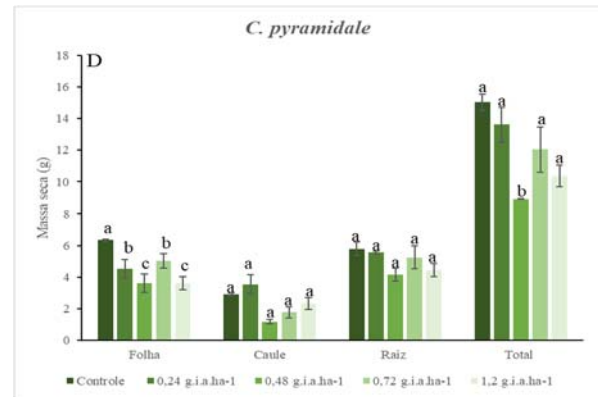
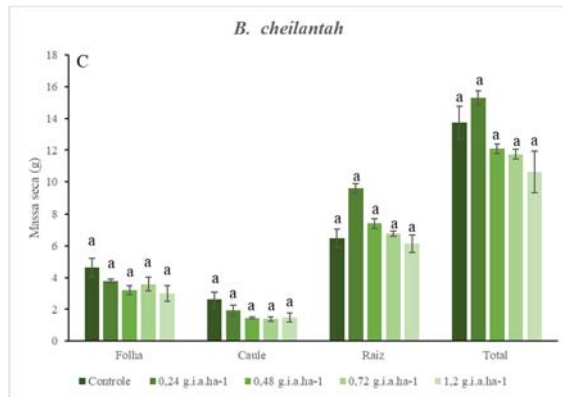
auto-oxidação, originando radicais superóxidos que sofrem dismutação, formando peróxido de hidrogênio. Essas substâncias provocam a degradação das membranas, resultando em peroxidação de lipídios, o que leva ao vazamento do suco celular e, eventualmente, à morte do tecido. Diquat e Paraquat são herbicidas não-seletivos, aplicados em pós-emergência, com translocação reduzida (contato) e baixa persistência, empregados para o controle total da vegetação (Jones; Vale, 2000; Suntres, 2002; Marchi et al., 2008). A elevada produção de espécies reativas de oxigênio apresenta-se como especialmente danosa para os tecidos fotossintetizantes, notadamente as folhas, devido ao acelerado processo de peroxidação das membranas celulares (Gomes et al., 2016; Barros et al., 2019; Rezende-Silva et al., 2019).

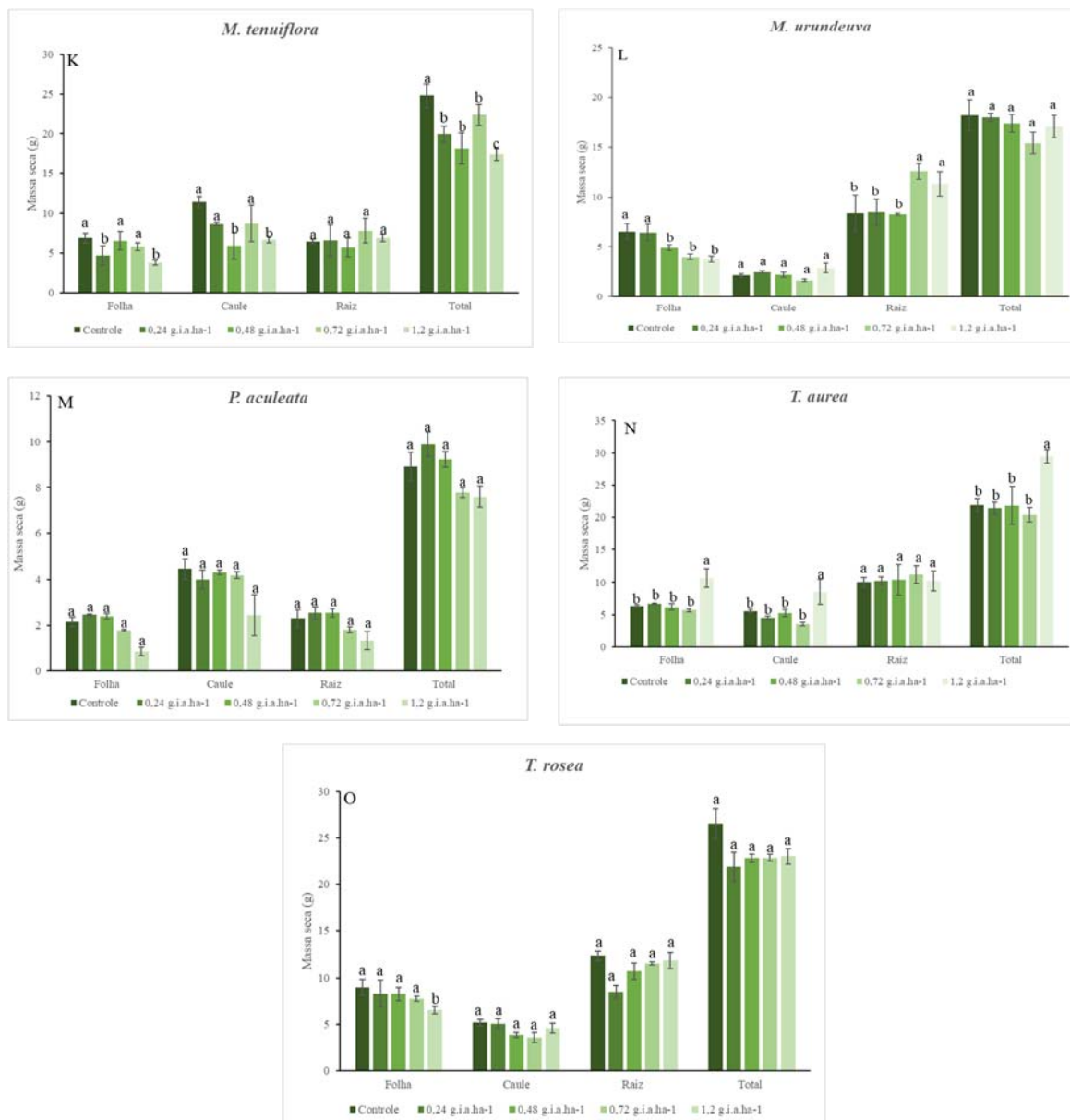
4.1.3 Matéria seca

As espécies, expostas às doses crescentes de deriva de diquat, apresentaram variações nas matérias secas da folha (MSF), caule (MSC), raiz (MSR) e total (MST) (Figura 3). *A. pyrifolium* (Figura 3B), *B. cheilantia* (Figura 3C), *H. courbaril* (Figura 3G), *L. férrea* (Figura 3H), *M. caesalpinifolia* (Figura 3J), e *P. aculeata* (Figura 3M), não apresentaram redução de matéria seca em nenhum órgão analisado (folha, caule, raiz e total) quando expostas à contaminação por deriva de diquat 0 (aplicação de água) 1,2 mL por hectare corresponde a 10% da dose comercial (0,24 g.i.a.ha⁻¹) 2,4 mL por hectare corresponde a 20% da dose comercial (0,48 g.i.a.ha⁻¹) 3,6 mL por hectare corresponde a 30% da dose comercial (0,72 g.i.a.ha⁻¹) 6 mL por hectare independente da dose.

Figura 3 – Matéria seca da folha, caule, raiz e total em mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro expostas a diferentes concentrações do herbicida diquat por deriva (0,24 g.i.a.ha⁻¹), (0,48 g.i.a.ha⁻¹), (0,72 g.i.a.ha⁻¹) e (1,2 g.i.a.ha⁻¹) do Reglone®).







Diferentes letras minúsculas na linha indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0,05$). Todos os dados são apresentados como média $\pm$ desvio padrão ($n = 4$).

Fonte: autoria própria, 2023.

A *A. cearensis* (Figura 3A) apresentou redução na MSR, quando submetidas as doses de 30 e 50% da dose comercial e redução na MST para as doses de 20, 30 e 50%. A espécie *C. umbrellata* (Figura 3E) apresentou redução de MSC apenas quando submetida a dose de 10%. *E. contortisiliquum* (Figura 3F) teve redução na MSF na dose de (6ml) 50%, a dose de 20% proporcionou um aumento de 24,37% na MSR e MST 6,2%, quando comparada ao tratamento sem exposição ao diquat e aos tratamentos representados pelas doses de 10, 30 e 50%.

De acordo com Borges (2021), a *E. contortisiliquum* possui uma estratégia de transpiração para garantir o acúmulo de matéria seca. As razões subjacentes a essa estratégia não estão completamente esclarecidas. Sabe-se que a abertura estomática está correlacionada

ao aumento da relação C_i/C_a (concentração interna de CO_2 /concentração de CO_2 no ambiente) induzida pelos herbicidas. A reduzida concentração de C_i no mesófilo foliar resulta em uma elevação na taxa de fotorrespiração, e a abertura dos estômatos pode atenuar os efeitos adversos desse fenômeno nas plantas, como discutido por Vivancos et al. em 2011.

A espécie *M. ophtalmocentra* (Figura 3I) teve redução na MSC com a dose de 30%, porém na MST, a dose de 10% proporcionou um aumento comparado ao tratamento controle e as doses de 20, 30 e 50%, com efeito mais acentuado na dose de 30%, apresentando redução de 20,33%.

M. tenuiflora (Gráfico K) apresentou decréscimo na MSF nas doses de 10 e 50%, na MSC nas doses de 20 e 50%, já para a MST todas as doses analisadas proporcionaram redução, comparada ao tratamento sem contaminação por diquat, com efeito mais acentuado nas espécies que foram submetidas a dose de 50%.

M. urundeuva (Gráfico L) teve redução da MSF nas doses de 20, 30 e 50%, já para a MSR as duas maiores doses proporcionaram um incremento quando comparada a testemunha sem herbicida e que receberam as doses de 10 e 20%. O aumento pode sugerir que a espécie *M. urundeuva* tem mecanismos adaptativos, tais como absorção diferenciada (Tate et al., 2019), habilidade de metabolização (Peragón e Amores-Escobar, 2018), insensibilidade da enzima-alvo (Baerson et al., 2002), entre outros.

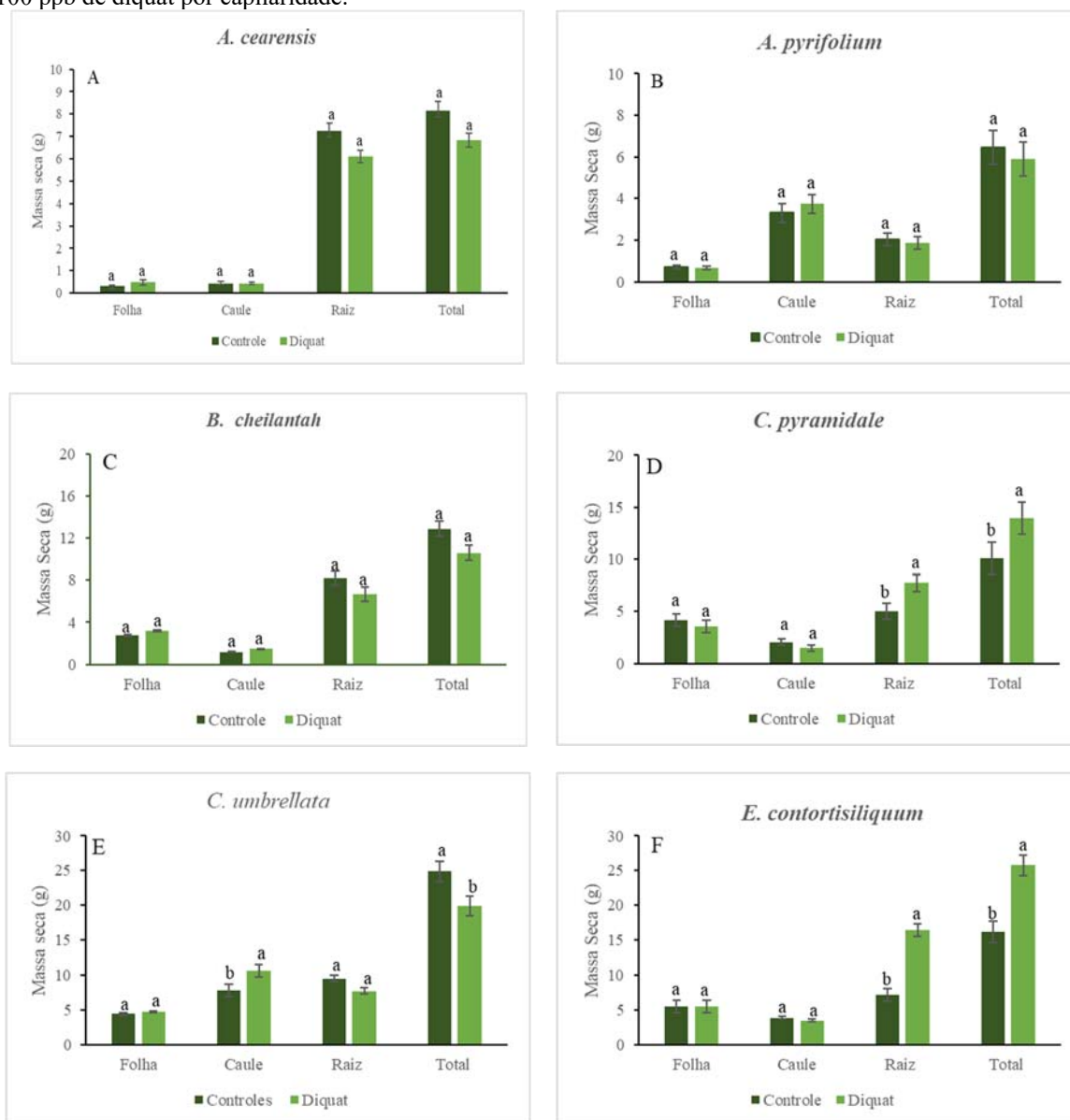
A exposição de *T. aurea* (Gráfico N) a maior dose analisada (50%) proporcionou um incremento na MSF, MSC e MST comparado ao tratamento sem herbicida e as espécies que receberam as doses de 10, 20 e 30% da dose comercial do diquat. Resultados similares foram encontrados por Borges (2020) onde a *T. aurea* exibiu uma discreta redução na matéria seca das folhas e um leve aumento na biomassa seca das raízes em decorrência da presença do herbicida.

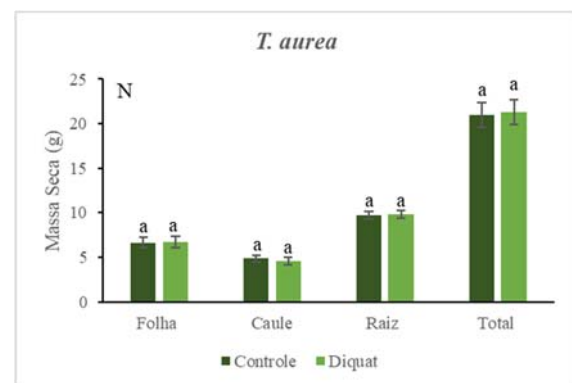
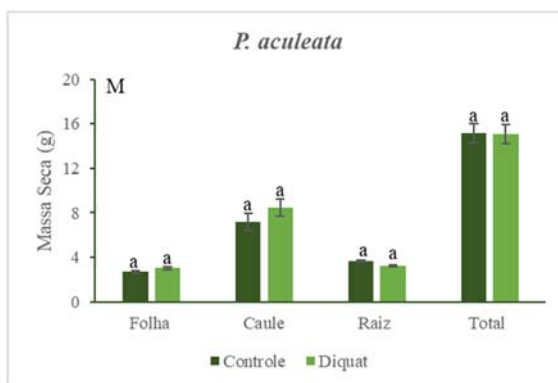
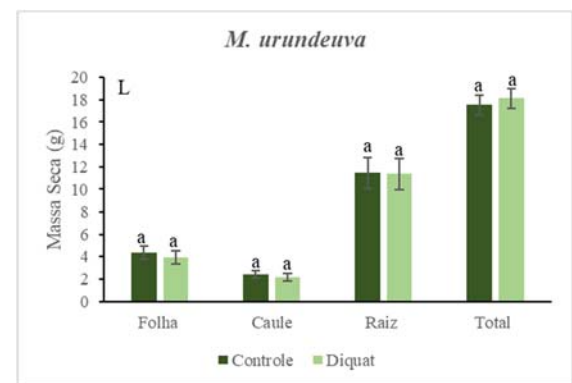
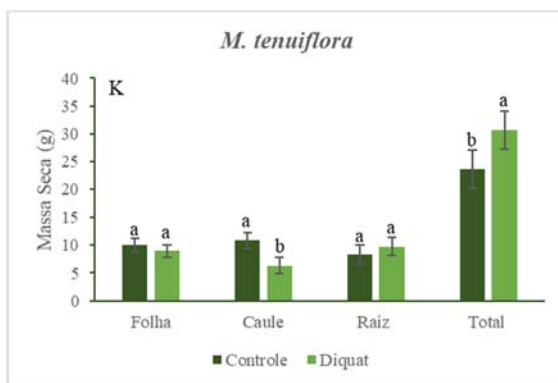
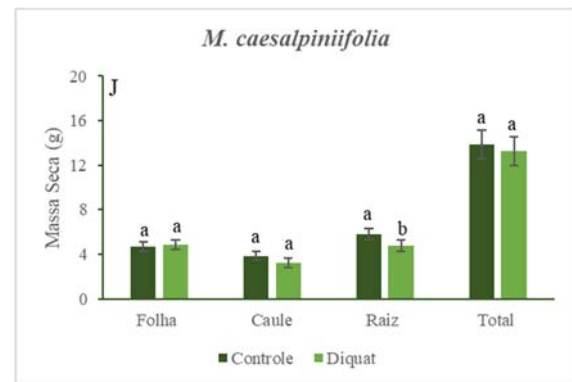
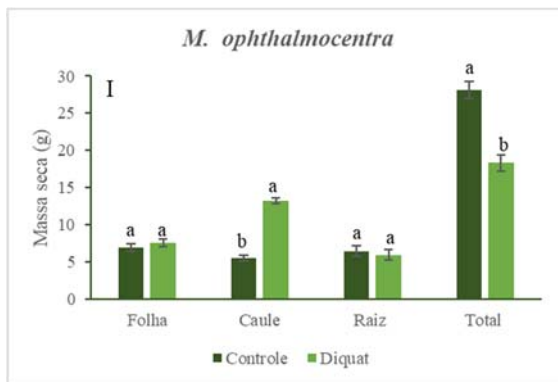
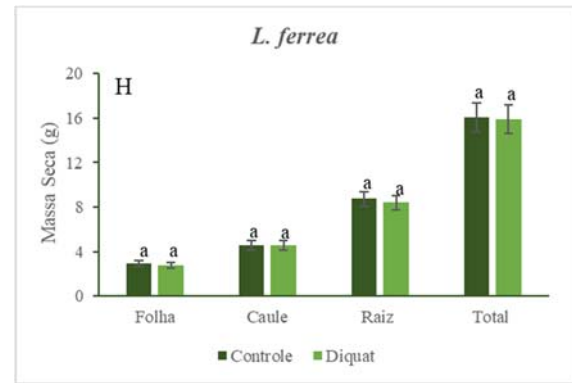
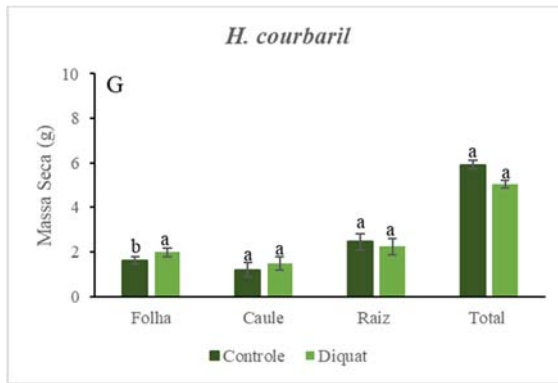
Quanto a variação nas respostas das espécies, cada espécie de planta pode reagir de maneira diferente a herbicidas, dependendo de sua tolerância natural, características fisiológicas e anatômicas. Portanto, as variações nas respostas observadas podem ser atribuídas às características individuais de cada espécie. Algumas espécies podem ser mais sensíveis a doses mais baixas, enquanto outras podem resistir a doses mais altas. As respostas diferenciadas podem ser resultado das características específicas de cada planta em relação às doses de herbicida aplicadas.

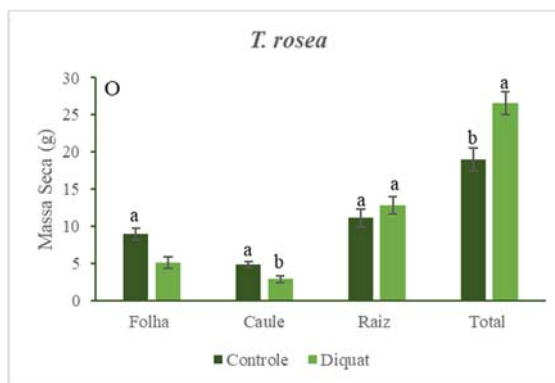
4.2 EFEITO CONTAMINAÇÃO POR PERCOLAÇÃO DO DIQUAT SOBRE ESPÉCIES ARBÓREAS

As espécies arbóreas não apresentaram variações na matéria seca da folha (MSF), caule (MSC), raiz (MSR) e total (MST) (Figura 4). *A. cearensis*, *A. pyrifolium*, *B. cheilantah*, *L. férrea*, *M. urundeuva*, *P. aculeata* e *T. aurea* não apresentaram redução de matéria seca em nenhum órgão analisado (folha, caule, raiz e total) quando expostas à contaminação por capilaridade de diquat a 100 ppb de diquat na dose comercial do Reglone®, respectivamente.

Figura 4 – Matéria seca da folha, caule, raiz e total de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro expostas a 100 ppb de diquat por capilaridade.







Diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0,05$). Todos os dados são apresentados como média $\pm$ desvio padrão ($n = 4$).

Fonte: autoria própria, 2023.

As espécies *C. pyramidale*, *E. contortisiliquum* apresentaram diminuição para a (MSR) e (MST). As espécies *H. courbaril*, foi observada uma diminuição na (MSF), enquanto nas espécies *M. ophthalmocentra*, *C. umbrellata*, *M. tenuiflora* e *T. rosea*, ocorreu uma diminuição na (MSC) e (MST). No estudo conduzido por Pereira em (2021), observou-se que as mencionadas espécies manifestaram sintomas visuais de intoxicação, acompanhados por uma notável diminuição na massa seca das raízes e no peso total, quando comparadas ao grupo controle, durante todas as avaliações realizadas. Essa incidência pode ser atribuída à capacidade dos herbicidas de serem absorvidos pelas raízes e, subsequentemente, atingirem as folhas, seguindo o fluxo transpiratório de absorção de água (Silva et al., 2020). A absorção pelos sistemas radiculares conduz a uma redução considerável na área foliar, podendo, em circunstâncias mais severas, resultar na mortalidade das plantas.

Observa-se que *M. ophthalmocentra* apresentou um aumento significativo na altura e uma diminuição significativa na área foliar em resposta à exposição ao diquat. Para *M. tenuiflora*, observa-se uma diminuição significativa no número de folhas e na altura em resposta ao herbicida. *T. aurea* apresentou um aumento significativo na área foliar em resposta à exposição ao defensivo agrícola. *T. rosea* apresentou uma diminuição significativa na área foliar em resposta ao agrotóxico. Esses resultados indicam que, em comparação com o controle, as espécies *M. ophthalmocentra* e *T. aurea* mostraram alterações significativas em parâmetros como altura e área foliar em resposta à exposição ao diquat. Por outro lado, *M. tenuiflora* e *T. rosea* apresentaram diferenças significativas em algumas características, indicando respostas específicas dessas espécies ao herbicida. Algo que pode explicar esses resultados se dá ao fenômeno de maior crescimento de plantas em resposta à exposição a herbicidas é conhecido como hormesis (Brito et al., 2018), sendo comumente observado em plantas expostas a concentrações muito baixas de herbicidas. É plausível que a capacidade dos solos em adsorver

a maior parte do herbicida aplicado tenha disponibilizado uma quantidade suficientemente reduzida para estimular o crescimento de *M. ophthalmocentra*, *M. tenuiflora*, pesquisas anteriores já identificaram o fenômeno da hormesis em plantas cultivadas expostas a herbicidas, atribuindo a maior assimilação de CO₂ como o mecanismo primordial para o aumento no acúmulo de matéria (Brito et al., 2018; Nascentes et al., 2018)

Tabela 5 – Número de folhas, altura e área foliar de mudas de espécies nativas do Nordeste brasileiro após exposição por capilaridade a 100 ppb de diquat.

Espécie	Número de folhas		Altura (cm)		Área foliar (cm ²)	
	Controle	Diquat	Controle	Diquat	Controle	Diquat
<i>A. cearensis</i>	6,00 a	6,60 a	0,19 a	0,18 a	116,50 a	130,89 a
<i>A. pyrifolium</i>	7,80 a	6,60 a	0,18 a	0,19 a	72,93 a	54,47 a
<i>B. cheilantah</i>	10,00 a	13,00 a	0,27 a	0,29 a	566,90 a	614,06 a
<i>C. pyramidale</i>	8,40 a	12,80 a	0,30 a	0,25 a	496,03 a	515,83 a
<i>C. umbrellata</i>	16,40 a	18,60 a	0,56 a	0,60 a	877,05 a	933,98 a
<i>E. contortisiliquum</i>	14,80 a	14,75 a	0,55 a	0,53 a	844,74 a	1027,42 a
<i>H. courbaril</i>	6,40 a	6,20 a	0,19 a	0,26 a	202,09 a	225,27 a
<i>L. ferrea</i>	20,00 a	17,60 a	0,66 a	0,72 a	580,80 a	598,05 a
<i>M. ophthalmocentra</i>	24,80 b	40,80 a	0,52 b	0,93 a	818,31 a	503,99 b
<i>M. caesalpinifolia</i>	12,40 a	13,20 a	0,47 a	0,43 a	886,67 a	952,50 a
<i>M. tenuiflora</i>	68,20 a	60,60 b	1,09 a	0,89 b	785,57 a	887,87 a
<i>M. urundeuva</i>	11,60 a	11,80 a	0,37 a	0,36 a	520,90 a	564,05 a
<i>P. aculeata</i>	35,40 a	37,80 a	0,84 a	0,92 a	227,48 a	310,64 a
<i>T. aurea</i>	15,20 a	18,20 a	0,32 a	0,35 a	635,65 b	843,41 a
<i>T. rosea</i>	15,80 a	13,00 a	0,41 a	0,28 a	1330,41 a	740,62 b
C.V. (%)	25,25		28,62		27,28	

*Diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas entre os tratamentos ($P < 0,05$). Todos os dados são apresentados como média $\pm$ desvio padrão ($n = 4$).

Fonte: autoria própria, 2023.

As espécies florestais são moldadas pela duração e sazonalidade do período seco, o que influencia adaptações das espécies para lidar com o estresse hídrico. Na caatinga, onde a maioria das espécies é caducifólia, algumas perdem as folhas logo após a estação chuvosa, enquanto outras as mantêm por mais tempo. A queda das folhas em ambientes secos pode ocorrer devido à idade avançada, aumento do estresse hídrico, variação de temperatura ou

redução do fotoperíodo (Borchert et al., 2002). O que explica por exemplo a diminuição na área foliar da *T. rósea*.

5 CONCLUSÕES

As espécies nativas do cerrado e da caatinga demonstram variabilidade em relação à sua tolerância ao diquat. Tais descobertas revelam a existência de uma diversidade significativa na capacidade das plantas em lidar com o diquat. Essa heterogeneidade na tolerância ao herbicida tem implicações cruciais para a preservação e manejo dessas espécies nos referidos ecossistemas. Destaca-se, assim, a importância de considerar as diferenças individuais na tolerância ao diquat ao implementar práticas agrícolas ou estratégias de controle de vegetação nessas regiões, visando a preservação efetiva da biodiversidade e o equilíbrio desses ambientes naturais.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. **Caatingas: O domínio dos sertões secos**. In: Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. 1ª Ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.
- AGROFIT. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento: **Sistema de Agrotóxicos e Fitossanitários**. 2023. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso: 15/08/2023.
- AMORO, Pedro. **A Redução dos Riscos dos Pesticidas pela Protecção Integrada**. Lisboa – Portugal, Instituto Superior de Agronomia, Departamento de Protecção das Plantas e Fitoecologia, Projeto Agro 13 – Série Divulgação Agro 13: 1/02, p. 5 - 99, 2003.
- ANDERSON, Julie C.; MARTEINSON, Sarah C.; PROSSER, Ryan S. **Prioritization of pesticides for assessment of risk to aquatic ecosystems in Canada and identification of knowledge gaps**. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology Volume 259, p. 171-231, 2021.
- DE OLIVEIRA, M. F.; KARAM, D.; MATRANGOLO, WJR. **Métodos de manejo de plantas daninhas**. 2015.
- EDDLESTON, M. **Herbicidas Bipiridil. Em Toxicologia de Cuidados Intensivos**, 2ª ed.; Springer International Publishing: Berlim, Alemanha, 2016; páginas 1–20.
- EUROPEAN FOOD SAFETY AUTHORITY. **Conclusion on the peer review of the pesticide risk assessment of the active substance diquat**. EFSA Journal, v. 13, n. 11, p. 4308, 2015.
- FRANZ, J. E.; MAO, M. K.; SIKORSKI, J. A. **Glyphosate: A Unique Global Herbicide**. American Chemical Society, Washington DC, 1997, p.653, 1972.
- HESS, F. D. **Light-dependent herbicides: an overview**. Weed Science, v. 48, p. 160-170, 2000.
- HILZ, Emilia; VERMEER, Arnoldus WP. **Spray drift review: The extent to which a formulation can contribute to spray drift reduction**. Crop Protection, v. 44, p. 75-83, 2013.
- KIILL, Lúcia Helena Piedade et al. **Biodiversidade da Caatinga como potencialidade para a agricultura familiar**. AGRICULTURA FAMILIAR, p. 15, 2019.
- LIMA, Antônia Francisca; DE ASSIS SILVA, Edvânia Gomes; DE FREITAS IWATA, Bruna. **Agriculturas e agricultura familiar no Brasil: uma revisão de literatura**. Retratos de Assentamentos, v. 22, n. 1, p. 50-68, 2019.
- MEDEIROS, Bruna Aparecida de Paula et al. **Practical Knowledge of Injuries Caused by Simulated Herbicide Drift in Young Tomato Plants**. Agrochemicals, v. 2, n. 1, p. 150-169, 2023.
- MEYERS, Stephen L. et al. **Response of sweetpotato to diquat applied pretransplanting**. Weed Technology, v. 34, n. 5, p. 637-641, 2020.

MORO, M. F.; NIC LUGHADHA, E.; ARAÚJO, F. S.; MARTINS, F. R. A **Phytogeographical Metaanalysis of the Semiarid Caatinga Domain in Brazil**. Botanical Review, v. 82, n. 2, p. 91–148, 2016. DOI. 10.1007/s12229-016-9164-z.

NISAR, Nazia et al. **Metabolismo dos carotenóides nas plantas**. Planta molecular, v. 8, n. 1, pág. 68-82, 2015.

NISAR, R. et al. **Diquat causes caspase-independent cell death in SH-SY5Y cells by production of ROS independently of mitochondria**. Archives of Toxicology, v. 89, p. 1811-1825, 2015.

PORTO-GONÇALVES, Carlos Walter. **As Minas e os Gerais: breve ensaio sobre desenvolvimento e sustentabilidade a partir da geografia do Norte de Minas**. Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade, v. 3, n. 02, p. 03-25, 2021.

REIS, FC, VICTÓRIA FILHO, R, ANDRADE, MT & BARROSO, AAM 2019, **Use of herbicides in sugarcane in the São Paulo state**. Planta Daninha, vol. 37, pp. e019184227

RIBEIRO, E. M. S.; SANTOS, B. A.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; TABARELLI, M.; SOUZA, G.; LEAL, I. R. **Phylogenetic impoverishment of plant communities following chronic human disturbances in the Brazilian Caatinga**. Ecology, v. 97, n. 6, p. 1583–1592, 2016. DOI. 10.1890/15-1122.1

SANTOS, J. C.; LEAL, I. R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; FERNANDES, G. W.; TABARELLI, M. **Caatinga: The scientific negligence experienced by a dry tropical forest**. Tropical Conservation Science, v. 4, n. 3, p. 276–286, 2011. DOI. 10.1177/194008291100400306

SCHOLTEN, Rebecca C. et al. **Hyperspectral VNIR-spectroscopy and imagery as a tool for monitoring herbicide damage in wilding conifers**. Biological Invasions, v. 21, p. 3395-3413, 2019.

SHERWANI, Shariq I.; ARIF, Ibrahim A.; KHAN, Haseeb A. **Modes of action of different classes of herbicides**. Herbicides, physiology of action, and safety, p. 165-186, 2015.

SOBRINHO, M. S.; TABARELLI, M.; MACHADO, I. C.; SFAIR, J. C.; BRUNA, E. M.; LOPES, A. V. **Land use, fallow period and the recovery of a Caatinga forest**. Biotropica, v. 48, n. 5, p. 586–597, 2016. DOI.10.1111/btp.12334

TAKADA, E. I. **Efeito de doses do herbicida Diuron sobre a germinação da semente de sorgo granífero**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Tecnologia em Biocombustíveis) – Faculdade de Tecnologia de Araçatuba, Araçatuba, 2012. Disponível em: <<http://www.fatecaracatuba.edu.br/suporte/upload/Biblioteca/BIO%2017711207148%20%20Autor%20Edegar%20Itiro%20Takada.pdf>>. Acesso em: 10 dezembro de 2023.

TONGUR, Timur; AYRANCI, Erol. **Adsorption and electrosorption of paraquat, diquat and difenzoquat from aqueous solutions onto activated carbon cloth as monitored by in-situ uv-visible spectroscopy**. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 9, n. 4, p. 105566, 2021.

TONGUR, Timur; AYRANCI, Erol. **Adsorção e eletrossorção de paraquat, diquat e difenzoquat de soluções aquosas em tecido de carvão ativado, conforme monitorado por espectroscopia UV-visível in-situ.** Revista de Engenharia Química Ambiental, v.4, pág. 105566, 2021.

VELLOSO, A. L.; SAMPAIO, E. V. S. .; PAREYN, F. G. C. **Ecorregiões: Propostas para o bioma Caatinga. Resultados do Seminário de Planejamento Ecorregional da Caatinga/Aldeia-PE.** Recife: APNE/ICA/TNC, 2002.

ZIELONKA J. RYBAK M. CELÍŃSKA J. et al. **Efeito da heparina na depleção enzimática de NADH estimulada pelo viológeno.** Chem Res Toxicol 2006; 19: 668–673.