

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Instituto de Ciências Agrárias**  
**Mestrado Acadêmico em Ciências Florestais**

**José Ângeles Moreira de Oliveira**

**Deriva simulada do picloram e glyphosate em *Peltophorum dubium*, uma  
espécie nativa do Cerrado Brasileiro**

**Montes Claros**

**2024**

**José Ângeles Moreira de Oliveira**

**Deriva simulada do picloram e glyphosate em *Peltophorum dubium*, uma  
espécie nativa do Cerrado Brasileiro**

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

**Orientador:** Leonardo David Tuffi Santos

**Coorientador:** Rodinei Facco Pegoraro

**Montes Claros**

**2024**

Oliveira, José Ângeles Moreira.

O48d Deriva simulada do picloram e glyphosate em *Peltophorum* dubium, uma espécie  
2024 nativa do Cerrado Brasileiro[manuscrito]/ José Ângeles Moreira de Oliveira. Montes  
Claros, 2024.  
94f.: il.

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Ciências Florestais.  
Universidade Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador: Leonardo David Tuffi Santos

Banca examinadora: Stanley Schettino, Christiane Augusta Diniz Melo.

Inclui referências: f. 24-33; 60-66; 88-93

1. Comunidades vegetais -- Teses. 2. Plantas dos cerrados -- Teses. 3. Intoxicação --  
Teses. 4. Plantas -- Efeito dos herbicidas -- Teses. 5. Fotossíntese -- Teses. I. Tuffi  
Santos, Leonardo David. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de  
Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 632.0:630

ELABORADA PELA BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA DO ICA/UFMG  
Nádia Cristina Oliveira Pires / CRB-6/2781



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

Aos 20 dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 8:00 horas, sob a Presidência do Professor Leonardo David Tuffi Santos, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Stanley Schettino, D. Sc. (UFMG/ICA) e Christiane Augusta Diniz Melo, D. Sc. (UFLA), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de **José Ângeles Moreira de Oliveira**, aluno do Curso de Mestrado em Ciências Florestais. Após a avaliação do referido aluno, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa da Dissertação intitulada: “**Deriva simulada do picloram e glyphosate em *Peltophorum dubium*, uma espécie nativa do Cerrado Brasileiro**”, sendo o aluno considerado APROVADO. E, para constar, eu, Professor Leonardo David Tuffi Santos, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.

OBS.: O aluno somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 74 do regulamento do Curso de Mestrado em Ciências Florestais, conforme apresentado a seguir:

**Art. 74 – Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do colegiado do Curso, com a anuência do orientador, no mínimo 3 (três) exemplares impressos e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação, no prazo de 60 (sessenta) dias.**

Montes Claros, 20 de fevereiro de 2024.

Leonardo David Tuffi Santos

Orientador

Christiane Augusta Diniz Melo

Membro

Stanley Schettino

Membro



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo David Tuffi Santos, Professor do Magistério Superior**, em 20/02/2024, às 12:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Stanley Schettino, Professor do Magistério Superior**, em 20/02/2024, às 13:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Christiane Augusta Diniz Melo, Usuária Externa**, em 20/02/2024, às 15:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3026207** e o código CRC **6CAFA919**.

---

**Referência:** Processo nº 23072.207806/2024-64

## DEDICATÓRIA

A DEUS pela saúde.

Aos meus pais Aldo Moreira (*in memória*) e Maria Ires, exemplos de amor, caráter e dedicação, que me mostraram desde cedo o valor e o poder transformador da educação, ensinamentos que levarei por toda minha vida. Aos meus irmãos, Laura, Lorena e Carlos, pelo companheirismo, fontes de inspiração, amor, carinho e apoio incondicional em todos os momentos de minha vida. A minha namorada, Isabela, por todo apoio, companheirismo e compreensão.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por permitir mais uma conquista;

Aos meus pais Aldo Moreira (*in memoriam*) e Maria Ires, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando e incentivando na minha formação acadêmica. Aos meus irmãos Laura, Lorena e Carlos que sempre me apoiaram e motivaram;

À minha namorada Isabella Karoline, pelo companheirismo e paciência nos momentos de ausência;

Ao curso de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal de Minas Gerais, pela oportunidade de aprendizado;

Ao orientador e amigo Prof. Leonardo Tuffi, pelo cuidado, respeito e paciência na transmissão do conhecimento, contribuindo para a minha formação pessoal, profissional e humana;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado (COD 001);

Ao técnico Luan Donato e aos demais amigos e companheiros do Laboratório de Biologia e Manejo de Plantas Daninhas, com quem tive o prazer de conviver e pelo suporte necessário para a realização da presente pesquisa;

A todos os pós-graduandos do programa de Ciências Florestais com quem tive a satisfação de conviver durante essa jornada acadêmica;

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desse trabalho, o meu Muito Obrigado.

“Sorte é o que acontece quando a  
preparação encontra a oportunidade”.

*Sêneca*

## Deriva simulada do picloram e glyphosate em *Peltophorum dubium*, uma espécie nativa do Cerrado Brasileiro

### RESUMO

O herbicida picloram é um mimetizador de auxina, enquanto o glyphosate é um inibidor da enzima 5-enol-piruvilchiquimato-3-fosfato-sintase. Ambos apresentam potencial em causar danos em espécies não-alvo por meio da deriva. *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., por ser uma espécie de ocorrência frequente em fragmentos florestais do Cerrado próximo a grandes áreas de monocultivo, tem potencial de ser utilizada no biomonitoramento. Dessa forma, objetivou-se avaliar o efeito da deriva de picloram e glyphosate sobre *P. dubium* e o potencial bioindicador da espécie aos herbicidas. Foram conduzidos dois experimentos. No primeiro, avaliou-se o efeito da deriva do picloram em mudas de *P. dubium*. O desenho experimental foi realizado no delineamento de blocos casualizados com 4 repetições. As doses aplicadas corresponderam a subdoses da dose comercial recomendada (960 g e. a. ha<sup>-1</sup>), em simulação à deriva do herbicida, sendo 19,2; 38,4; 76,8; 153,6; 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram e a testemunha. Já no segundo experimento, foi avaliado o efeito da deriva de glyphosate em mudas de *P. dubium*. O experimento foi montado em blocos casualizados com 6 repetições. Para simular a deriva as plantas foram submetidas a aplicação de subdoses da dose comercial recomendada (1440 g e. a. ha<sup>-1</sup>), correspondente a 28,8; 57,6; 115,2; 230,4 e 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate e a testemunha. Como resultados do primeiro experimento, observou-se que nas maiores doses, aos 7 dias após aplicação (DAA), as plantas submetidas a 153,6 e 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram apresentaram 40% de intoxicação. No decorrer do tempo, o nível de intoxicação foi avançando e aos 45 dias após aplicação a partir da dose 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram as plantas apresentaram intoxicação acima de 90%, ocasionando a morte total das plantas nas maiores doses aplicadas. No segundo experimento, as plantas de *P. dubium* também apresentaram alterações na morfologia e fisiologia, principalmente a partir da dose de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate. Com relação à intoxicação das plantas de *P. dubium*, pode-se observar baixa intoxicação (<4%) em doses inferiores a 115,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate, por outro lado, as plantas expostas a 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> apresentavam 40% de intoxicação provocada pela ação do glyphosate aos 45 DAA, respectivamente. Portanto, a espécie possui potencial como bioindicador de picloram no meio ambiente, podendo ser usada no biomonitoramento da ocorrência da deriva desse herbicida em áreas próximas aos cultivos agrícolas. Para o herbicida glyphosate a espécie apresentou sensibilidade somente nas maiores doses, tornando o seu uso como bioindicador não recomendado.

**Palavras-chave:** fragmentos florestais. espécie não-alvo. intoxicação. bioindicador. fotossíntese.

## Simulated drift of picloram and glyphosate on *Peltophorum dubium*, a native species of the Brazilian Cerrado

### ABSTRACT

The herbicide picloram is an auxin mimetic, while glyphosate is an inhibitor of the enzyme 5-enol-pyruvylchiquimate-3-phosphate synthase. Both have the potential to cause damage to non-target species through drift. *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. is a frequently occurring specie in Cerrado forest fragments close to large areas of monoculture and has the potential to be used in biomonitoring. The aim was therefore to assess the effect of picloram and glyphosate drift on *P. dubium* and the bioindicator potential of the species to herbicides. Two experiments were carried out. The first evaluated the effect of picloram drift on *P. dubium* seedlings. The experimental design was randomized blocks with 4 replications. The doses applied corresponded to underdoses of the recommended commercial dose (960 g a. e. ha<sup>-1</sup>), simulating herbicide drift, being 19.2; 38.4; 76.8; 153.6; 307.2 g a. e. ha<sup>-1</sup> of picloram and the control. In the second experiment, the effect of glyphosate drift on *P. dubium* seedlings was evaluated. The experiment was set up in randomized blocks with 6 replications. To simulate drift, the plants were subdosed with the recommended commercial dose (1440 g a. e. ha<sup>-1</sup>), corresponding to 28.8, 57.6, 115.2, 230.4 and 460.8 g a. e. ha<sup>-1</sup> of glyphosate and the control. The results of the first experiment showed that at the highest doses at 7 days after application (DAA) the plants subjected to doses of 153.6 and 307.2 g a. e. ha<sup>-1</sup> were 40% intoxicated. Over time, the level of intoxication progressed and at 45 days after application, from the dose of 76.8 g. e. a. ha<sup>-1</sup>, the plants showed intoxication of over 90%, causing total plant death at the highest doses applied. In the second experiment, *P. dubium* plants also showed changes in morphology and physiology, especially from the dose of 230.4 g a. e. ha<sup>-1</sup>. With regard to the intoxication of *P. dubium* plants, low intoxication (<4%) was observed at doses lower than 115.2 g a. e. ha<sup>-1</sup>, while plants exposed to 460.8 g a. e. ha<sup>-1</sup> showed 40% intoxication caused by the action of glyphosate at 45 DAA, respectively. Therefore, the species has potential as a bioindicator of picloram in the environment and could be used to biomonitor the occurrence of herbicide drift in areas close to agricultural crops. For the herbicide glyphosate, the species showed sensitivity only at the highest doses, making its use as a bioindicator not recommended.

**Keywords:** forest fragments. non-target species. intoxication. bioindicator. photosynthesis.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	12
2 OBJETIVOS .....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos .....	15
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	16
3.1 Uso de herbicidas na agricultura e os impactos em áreas adjacentes.....	16
3.2 Deriva de herbicidas.....	16
3.3 Picloram.....	18
3.4 Glyphosate.....	20
3.5 Bioindicadores em plantas .....	21
3.6 <i>Peltophorum dubium</i> (Sprengel) Taubert.....	23
3.7 Referências .....	25
4 ARTIGO(S).....	34
4.1 Artigo 1 - Deriva do picloram em <i>Peltophorum dubium</i> , uma espécie nativa do Cerrado brasileiro .....	34
4.2 Artigo 2 - Respostas morfofisiológicas e bioquímicas de <i>Peltophorum dubium</i> sob deriva de glyphosate.....	67
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	94

## 1 INTRODUÇÃO

O constante crescimento da população mundial eleva a demanda de produção de alimentos, energia e madeira, que por sua vez acarreta na intensificação e expansão das áreas de cultivo agrícola, pastagem e de florestas plantadas. No caso do Brasil, as áreas cultivadas são para atender em sua maioria, a demanda interna e externa por grãos, carnes, fibras e madeiras.

A demanda crescente de áreas agricultáveis impacta diretamente o meio ambiente, através da aplicação de agrotóxicos, especialmente herbicidas que são utilizados no manejo de plantas daninhas. Durante as pulverizações de herbicidas, a fragmentação da calda pode gerar gotas pequenas e partículas suspensas que podem alcançar áreas não alvo pelo processo denominado de deriva. A deriva de herbicidas impacta diretamente cultivos vizinhos, mananciais hídricos, comunidades urbanas e também os fragmentos florestais adjacentes a essas áreas tratadas, principalmente nos biomas que são historicamente mais explorados pelas atividades agrícolas mais intensivas.

O Cerrado brasileiro, unidade biológica considerada uma das mais importantes do mundo e o segundo maior bioma brasileiro, é o que mais sofre com perdas da biodiversidade pela degradação (Santos *et al.*, 2021; Dias; Moschini; Trevisan, 2017), inclusive com maior risco de extinção de espécies (Coelho *et al.*, 2020; Colli; Vieira; Dianese, 2020). Nos últimos vinte anos no Cerrado houve um aumento de 66% nas terras agrícolas com soja, milho, cana-de-açúcar, algodão e café (Ferraz-Almeida *et al.*, 2021), culturas que contribuem para o aumento do uso de agrotóxicos, principalmente herbicidas (Rezende-Silva *et al.*, 2019).

Em escala global estima-se que são usados aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de agrotóxicos, sendo que no Brasil este consumo tem sido superior a 300 mil toneladas de produtos comerciais (Spadotto; Gomes, 2021). Somente o herbicida glyphosate, considerado um dos principais produtos utilizados na agricultura, atingiu 230,51 toneladas de ingrediente ativo vendido em 2022. Por outro lado, o picloram, principal herbicida utilizado em pastagens, alcançou 3,87 toneladas de ingrediente ativo vendido no mesmo período (IBAMA, 2022).

O glyphosate é um herbicida sistêmico, não seletivo, de amplo espectro de ação em monocotiledôneas e eudicotiledôneas herbáceas e arbustivas, considerado como o herbicida mais utilizado em escala global no controle de plantas daninhas (Székács; Darvas, 2012). Esse herbicida teve seu uso crescente a partir do surgimento das

primeiras culturas geneticamente modificadas (GM) na década de 1990, sendo atualmente a maioria das culturas geneticamente modificadas concebidas para resistência ao produto (Novotny, 2022). Sua elevada eficácia e seu amplo espectro de ação, favorece o seu uso intensivo e recorrente, o que aumenta os riscos de intoxicação de espécies nativas não-alvo presente em áreas adjacentes aos cultivos.

Já o Picloram é um herbicida sistêmico absorvido pelas raízes, caules e folhas, comumente utilizado no controle de plantas anuais e perenes de folhas largas, que no Brasil é registrado para uso em pastagem, cana-de-açúcar, arroz e na erradicação de tocos de eucalipto na reforma de áreas florestais, em formulações puras ou em mistura a outros herbicidas (AGROFIT, 2024). Dependendo da concentração, pode causar diversas anormalidades de crescimento em plantas sensíveis, como: inibição do crescimento da raiz e da parte aérea, curvatura do caule, epinastia foliar, senescência foliar e danos nos cloroplastos, levando a clorose dos tecidos fotossinteticamente ativos e, finalmente, à morte das plantas sensíveis (Grossmann, 2010).

O uso intenso e difuso de glyphosate e picloram e a não observação de boas práticas durante a aplicação dos produtos é preocupante quanto a ocorrência de deriva, que além das questões agrônômicas de perda do produto e ineficácia de controle, causa um relevante problema ambiental e de saúde pública, dada à exposição a esses herbicidas e os impactos que estes podem causar.

Assim, a ocorrência da deriva de herbicidas no campo e seus efeitos em organismos não-alvo deve ser monitorada. Os herbicidas são convencionalmente detectados por métodos analíticos clássicos, como cromatografia gasosa (Yang *et al.*, 2023), cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC) (Lopes *et al.*, 2024), ensaios imunoabsorventes ligados a enzimas (Kocadal *et al.*, 2022) e eletroforese capilar (Singh *et al.*, 2020). No entanto, esses métodos são limitados e apresentam deficiências, como instrumentos complicados, trabalhosos e caros, além de demandar mão de obra altamente qualificada (Samsidar; Siddique; Shaarani, 2018).

Em contrapartida, o biomonitoramento com plantas torna-se vantajoso pelo fato dessas serem componentes essenciais de um ecossistema, por estarem expostas aos poluentes, por permitirem monitoramento *in situ*, por serem de baixo custo e trazer resultados robustos da saúde ambiental (Souza; Guedes; Fontanetti, 2016). A caracterização de uma espécie vegetal como bioindicador pode ser realizada através de diferentes biomarcadores foliares, incluindo sintomas visíveis, respostas bioquímicas, fisiológicas e morfoanatômicas aos contaminantes (Lima *et al.* 2017).

Nesse sentido, o biomonitoramento com plantas configura-se como técnica promissora e possível de ser utilizada para diferentes poluentes (Batista *et al.*, 2018), incluindo os herbicidas (Silva *et al.* 2022; Cruz *et al.*, 2021; Freitas-Silva *et al.*, 2020; Rezende-Silva *et al.*, 2019).

As plantas sensíveis são elementos potenciais na previsão e detecção de estresses ambientais (Parmar; Rawtani; Agrawal, 2016), sendo assim, torna-se possível realizar o monitoramento dos riscos de contaminantes para as comunidades vegetais usando a vegetação local como indicadores. Dentre as diversas espécies nativas do Cerrado, *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub, pertencente à família Fabaceae, é uma espécie arbórea com grande potencial de uso no biomonitoramento da ação de herbicidas no Cerrado, pois possui ampla distribuição (Silva; Rando; Carvalho, 2023), atendendo assim requisito para ser avaliada como espécie bioindicadora (Seiler; Decoteau; Davis, 2014).

*Peltophorum dubium* tem ocorrência frequente em áreas próximas da atividade agrícola, o que torna uma espécie vulnerável a problemas com a deriva de herbicidas, com destaque para glyphosate e picloram. Dessa forma, este trabalho torna-se essencial para a área de silvicultura, visto que possibilitará identificar os potenciais riscos que os herbicidas glyphosate e picloram podem causar para a espécie estudada. Além disso, os resultados obtidos permitirão identificar o potencial bioindicador da espécie na ocorrência de contaminação por esses herbicidas em fragmentos florestais adjacentes a áreas agrícolas, buscando estabelecer biomarcadores que possam determinar os efeitos dos herbicidas avaliados em seu tecido foliar. A hipótese testada foi que *Peltophorum dubium*. (Spreng.) Taub é sensível ao glyphosate e picloram em deriva e as respostas morfofisiológicas e bioquímicas à ação dos produtos podem ser usadas como biomarcadores em áreas adjacentes aos cultivos agrícolas.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo Geral

Avaliar o efeito da deriva de picloram e glyphosate sobre *Peltophorum dubium* e o potencial bioindicador da espécie aos herbicidas.

### 2.2 Objetivos Específicos

Avaliar o impacto da deriva de picloram e glyphosate no crescimento inicial de plantas de *P. dubium*;

Avaliar aspectos morfofisiológicos, bioquímicos e caracterizar os sintomas de intoxicação de plantas de *P. dubium* submetidas à deriva de picloram e glyphosate;

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 Uso de herbicidas na agricultura e os impactos em áreas adjacentes

Os herbicidas são uma ferramenta importante no manejo de plantas daninhas de áreas agrícolas e não-agrícolas e contribuem de forma significativa para garantir maior produção agrícola (Ofosu *et al.*, 2023). Apesar dos benefícios alcançados por esta tecnologia, os herbicidas são produtos tóxicos e sua utilização deve ser realizada com cuidado e de forma racional (Nath *et al.*, 2024).

A utilização de herbicidas possui como vantagens a eficácia e rapidez no controle de plantas daninhas (Yadav *et al.*, 2017), e quando comparado aos métodos de controle manual e mecânico, apresenta melhor desempenho operacional, eficácia e maior período residual (Niz *et al.*, 2018). Apesar das vantagens, a utilização de herbicidas necessita do uso de equipamentos adequados, mão de obra especializada e apresenta riscos ao ambiente e as pessoas. Dentre os principais problemas levantados na literatura estão a ocorrência de biótipos resistentes (Heap, 2014), intoxicação do homem e de outros organismos não-alvo, permanência por longos períodos no local aplicado, causando prejuízos a espécie cultivada em sucessão/rotação (Cooper; Dobson, 2007) e a ocorrência de deriva (Belo *et al.*, 2012, Tuffi Santos *et al.*, 2007; Vieira *et al.*, 2020).

O transporte dos herbicidas para áreas adjacentes ao local de aplicação pode ocorrer por meio de fontes de água, solos contaminados (Silva *et al.*, 2019; Passos *et al.*, 2019; Dos Santos *et al.*, 2019) e através da deriva (Bueno; Cunha, 2020). A contaminação de fontes hídricas e solos ocorre por meio do processo de lixiviação e escoamento superficial de água e sedimentos contendo o herbicida para fora da área agrícola (Passos *et al.*, 2019). Já a deriva é influenciada por fatores meteorológicos e operacionais durante a aplicação do herbicida (Zampiroli *et al.*, 2023).

#### 3.2 Deriva de herbicidas

Quando se trata de aplicação de herbicidas, problemas relacionados à deriva são relatados com frequência. A deriva é caracterizada pelo arraste involuntário de gotículas de herbicidas a favor do vento de uma área alvo para uma área não-alvo, esse arraste involuntário representa risco potencial para receptores não-alvo, como água, animais e plantas (Moore *et al.*, 2022; Rivas-Garcia *et al.*, 2022). Os efeitos da deriva na pulverização de herbicidas podem afetar indiscriminadamente a população

de plantas não-alvo, que crescem nas proximidades dos campos agrícolas (Cederlund, 2017).

A deriva é considerada um dos maiores problemas da agricultura, pois ela reduz a dose real aplicada sobre o alvo, além de ser uma fonte de intoxicação de trabalhadores e de contaminação ambiental (Belo *et al.*, 2012). Em aplicações dirigidas de produtos não-seletivos, a própria cultura pode ser afetada pelo contato com o herbicida, podendo causar intoxicação, redução no crescimento e até a morte das plantas cultivadas (Tuffi Santos *et al.*, 2007).

Na literatura, o estudo da deriva de herbicidas e seus efeitos em plantas arbóreas não-alvo é comum para espécies cultivadas, como paricá (Pereira *et al.*, 2017) e principalmente para o eucalipto (Tiburcio *et al.*, 2012; Costa *et al.*, 2012; Santos *et al.*, 2019). Apesar de haver diversos estudos relacionados aos impactos da deriva de herbicidas para culturas sensíveis, poucas informações estão disponíveis sobre as consequências para comunidades de plantas nativas ao redor de paisagens agrícolas (Vieira *et al.*, 2020).

Condições ambientais desfavoráveis no momento da aplicação, como altas temperaturas e ventos fortes, favorecem o risco de contaminação por deriva, e para alguns herbicidas como o glyphosate, a área afetada pode chegar a vários quilômetros quadrados, atingindo vegetação nativa próxima (Lucadamo; Corapi; Gallo, 2018). Enquanto o risco de contaminação por picloram agrava-se em decorrência da sua elevada persistência no ambiente (Dumancas, 2014).

A deriva de herbicidas ao atingir espécies de plantas não-alvo em habitats adjacentes e em doses subletais pode provocar diferentes respostas nas plantas, tais como: a) plantas no estágio de muda terão suas partes vegetativas afetadas, comprometendo o crescimento inicial e o desenvolvimento b) plantas podem expressar efeitos negativos na produção de sementes em fases posteriores, c) plantas na fase reprodutiva durante a pulverização têm sua produção de sementes impactada e/ou d) as partes vegetativas da próxima geração são afetadas (Boutin *et al.*, 2014).

Apesar de existirem diversos estudos sobre o impacto do glyphosate em organismos não-alvo, apenas alguns relatos documentaram a sensibilidade de espécies florestais a esse herbicida (Percival, 2017; Monquero *et al.*, 2016). Alguns trabalhos têm sido realizados utilizando espécies florestais para observar os efeitos de subdoses de glyphosate em deriva simulada e a seletividade do herbicida para espécies arbóreas como araçá-amarelo (*Psidium cattleianum* Sabine), pau-viola

(*Citharexylum myrianthum* Cham.) e cedrinho (*Cedrela odorata* L.) (Pereira *et al.*, 2015), cumaru (*Amburana cearensis* (Allemão) A. C. Sm.), angico-vermelho (*Anadenanthera macrocarpa* (Benth.) Brenan), mororó (*Bauhinia cheilantha* (Bong.) Steud.), tamboril (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), jucá (*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz), sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia* Benth.), jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir.), aroeira (*Myracrodruon urundeuva* M. Allemão) e caraibeira (*Tabebuia aurea* (Silva Manso) Benth. & Hook. f. ex S. Moore) (Borges *et al.*, 2021) e, principalmente, eucalipto (*Eucalyptus* spp.) (Tuffi Santos *et al.*, 2005; Tuffi Santos *et al.*, 2006; Tuffi Santos *et al.*, 2007; Tuffi Santos *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2012).

Com relação ao picloram, observa-se que há poucos trabalhos que avaliam o impacto deste herbicida em organismos não-alvo, mais precisamente em espécies florestais, com destaque para o trabalho desenvolvido por Monquero *et al.* (2016) que avaliou o crescimento de espécies arbóreas, (*Croton floribundus* Spreng.), (*Heliocarpus americanus* L.) e (*Myrsine coriacea* ((Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.)) sob deriva desse herbicida.

Dessa forma, atenção especial deve ser dada às espécies nativas do Cerrado brasileiro, devido ao alto potencial de exposição ao glyphosate e ao picloram. Fragmentos florestais próximos aos campos agrícolas podem sofrer redução da biodiversidade, em decorrência dos impactos ambientais a que são submetidos (Florescia *et al.*, 2017; Rezende-Silva *et al.*, 2019). Dentre esses impactos, a sensibilidade a herbicidas por espécies de plantas nativas no entorno das áreas agrícolas tem sido pouco investigada, e a relevância do impacto potencial do glyphosate e picloram nos ecossistemas, em especial para plantas não-alvo, ainda não foi elucidada, portanto, o monitoramento dos efeitos destes herbicidas na vegetação nativa torna-se relevante.

### 3.3 Picloram

O ácido 4-amino-3,5,6-tricloro-2-piridinocarboxílico, conhecido popularmente como picloram, é um herbicida mimetizador de auxinas derivado da piridina. Esse herbicida atua mimetizando o hormônio ácido indolacético ou auxinas naturais de plantas, interferindo na ação da RNA-polimerase, e conseqüentemente na síntese dos ácidos nucléicos e proteínas, causando mudanças metabólicas que levam a planta a

morte (Santos; Masini, 2007).

Uma característica comum dos herbicidas piridínicos é a sua resistência à degradação natural ou reações metabólicas em plantas (Mwakalesi; Potter, 2020), o que provoca elevada persistência no ambiente. A meia-vida do picloram no campo é de 20 a 300 dias, sendo a degradação acelerada em condições de calor e alta umidade (Rodrigues; Almeida, 2011).

No controle de plantas daninhas, o picloram pode ser aplicado na pós-emergência ou imediatamente após o corte dos arbustos e árvores para inibir a rebrota. Os herbicidas auxínicos foram os pioneiros com característica seletiva para gramíneas, sendo estes utilizados de forma isolada ou em combinação com outros ingredientes ativos em formulações comerciais (Arcaute; Larramendy; Soloneski, 2018). No Brasil a quantidade total de produtos formulados de herbicidas no período de 2022 era de 1.069, desse total 81 correspondia a produtos formulados de picloram, tendo este produto ocupado a 32<sup>o</sup> posição de ingrediente ativo mais vendido no ano (IBAMA, 2022).

A contaminação de organismos não-alvo pelo picloram, através da dispersão por deriva, pode causar diversos efeitos indesejáveis. A deriva pode provocar impactos na vegetação adjacente a áreas agrícolas, prejudicando negativamente plantas nativas não-alvo com impactos importantes na estrutura e função da comunidade vegetal (Olszyk *et al.*, 2017). Dependendo da concentração, esses produtos podem estimular a divisão celular e o crescimento, por outro lado, podem causar diversas anormalidades de crescimento, como inibição do crescimento da raiz e da parte aérea, curvatura do caule, epinastia foliar, senescência foliar e danos nos cloroplastos com clorose progressiva dos tecidos fotossinteticamente ativos e, finalmente, à morte das plantas sensíveis (Grossmann, 2010).

Na literatura é possível encontrar estudos utilizando outros herbicidas auxínicos, como triclopyr e fluroxipyr + triclopyr em deriva simulada em *Eucalyptus urograndis*, causando prejuízos para o desenvolvimento das plantas na fase de estabelecimento no campo (Carvalho *et al.*, 2018) e desenvolvimento inicial de espécies arbóreas nativas da Mata Atlântica em solo contaminado com herbicidas auxínicos (Ferreira *et al.*, 2019).

Já com relação ao picloram observa-se que há poucos trabalhos que avaliam o impacto deste herbicida em organismos não-alvo, mais precisamente em espécies florestais. Com destaque para o estudo de Monquero *et al.* (2016) que avaliou o

crescimento de espécies arbóreas, *Croton floribundus*, *Heliocarpus americanus* e *Myrsine coriacea* sob deriva de picloram, glyphosate e 2,4-D, identificando maior toxicidade para o picloram entre os herbicidas avaliados para todas as espécies, mesmo nas menores doses. Os principais sintomas observados da intoxicação por picloram foram epinastia, torção do caule, além de ressecamento do caule e ausência de folhas aos 120 dias após aplicação (Monquero *et al.*, 2016).

Dada a importância do picloram para agricultura e, em função do risco para o ambiente, na literatura outros estudos abordam sua persistência e degradação em ambiente aquático (Sanches Neto *et al.*, 2021), risco de lixiviação no perfil do solo (Passos *et al.*, 2019; Barros *et al.*, 2021), e potencial fitorremediador de *Brachiaria brizantha* em solos contaminados com picloram sob diferentes níveis de pH e de profundidade do solo (Braga *et al.*, 2016).

Dessa forma, torna-se necessário desenvolver estudos sobre potenciais riscos de intoxicação no desenvolvimento de espécies nativas causadas pela deriva de picloram, sobretudo em *Peltophorum dubium*, espécie importante na recuperação de áreas degradadas e de ocorrência frequente em fragmentos florestais.

### 3.4 Glyphosate

O glyphosate (N-fosfometil glicina), sintetizado em 1964 para uso industrial, teve seu uso como herbicida apenas em 1971. O termo glyphosate é utilizado para indicar tanto o ácido como seus sais, pois ambos são caracterizados como biologicamente equivalentes (Yamada; Castro, 2007).

O glyphosate é considerado o herbicida mais utilizado no controle químico de plantas daninhas mundialmente, nas atividades de agricultura e silvicultura (Novotny, 2022). Possui amplo espectro de ação, aplicado em pós-emergência, não seletivo e muito solúvel em água (Maqueda *et al.*, 2017). Pertence ao grupo dos herbicidas inibidores da enzima 5-enol-piruvilchiquimato-3-fosfato-sintase – EPSPS, resultando no acúmulo de chiquimato na planta e em uma perda de aminoácidos aromáticos (triptofano, fenilalanina e tirosina) necessários para produção de proteínas essenciais para o crescimento das plantas (Rodrigues; Almeida, 2011; Eceiza *et al.*, 2022).

Os sintomas mais comuns de intoxicação das plantas pelo uso do glyphosate são a paralisação do crescimento em altura e diâmetro, (Pereira *et al.*, 2015), clorose, seguida de necrose, senescência foliar, (Borges *et al.*, 2021; Tuffi Santos *et al.*, 2007;

Tuffi Santos *et al.*, 2008; Costa *et al.*, 2012), murcha, enrolamento das folhas das plantas e brotações anormais (Tuffi Santos *et al.*, 2005; Tuffi Santos *et al.*, 2006).

Apesar do mecanismo de ação do herbicida glyphosate ser amplamente conhecido (Martinez; Loening; Graham, 2018), alguns outros prováveis efeitos sobre as plantas não-alvo são menos estudados, esses efeitos secundários podem apresentar implicações importantes no crescimento de plantas (Florença *et al.*, 2017). Os efeitos causados pelo glyphosate variam em função de vários fatores como espécie e dose aplicada (Abreu *et al.*, 2022), e estágio de desenvolvimento da planta (Fipke *et al.*, 2019).

Alguns estudos realizados avaliando efeitos provocados pelo glyphosate em espécies nativas conseguiram identificar efeitos danosos, como alterações nas variáveis fotossintéticas em plantas de pequi (*Caryocar brasiliense*) expostas ao glyphosate, com reduções nas trocas gasosas, eficiência fotoquímica e teor de pigmentos cloroplastídicos, principalmente quando expostas as maiores doses do herbicida (Silva *et al.*, 2016). Outro estudo sobre a sensibilidade de espécies nativas, *Plathymenia reticulata* (vinhático), *Bowdichia virgilioides* (sucupira-preto), *Kielmeyera lathrophyton* (pau-santo) e *Solanum lycocarpum* (lobeira) submetidas a diferentes doses de glyphosate, apresentaram clorose e necrose foliar, mesmo na menor dose aplicada (160 g ha<sup>-1</sup>) (Machado *et al.*, 2013).

No entanto, ainda são poucos os trabalhos voltados para identificação dos impactos provocados por subdoses de glyphosate em deriva simulada em espécies nativas, como é o caso da *Peltophorum dubium*, tornando-se necessário identificar os riscos que este herbicida representa para a espécie, de forma a buscar alternativas para sua preservação e ainda investigar o seu uso como bioindicadora da presença do herbicida.

### 3.5 Bioindicadores de contaminantes ambientais em plantas

Nos últimos anos tornou-se perceptível a crescente preocupação social com a qualidade ambiental, tanto em escala global como regional e local. Essa preocupação está relacionada com evidências cada vez mais categóricas de que a poluição ambiental resulta na degradação dos ecossistemas. Tais perturbações exercem grande influência sobre plantas, que respondem por meio de modificações do estado morfológico, bioquímico e fisiológico (Rai, 2016).

O conhecimento de que plantas apresentam respostas à poluição ambiental são antigos, sendo os primeiros relatos ocorridos na Europa relacionados a escassez de musgos e líquens devido a poluição atmosférica (Souza; Guedes; Fontanetti, 2016). Entretanto, foi na década de 1960 que a investigação indicou que as plantas poderiam ser utilizadas como bioindicadores de poluentes no seu habitat (Burton, 2003).

Bioindicadores são organismos vivos como plantas, plânctons, animais e micro-organismos com capacidade de monitorar a saúde do meio ambiente, permitindo medir os impactos negativos de ações antrópicas no meio ambiente (Azzazy, 2020). Os organismos bioindicadores são capazes de revelar alterações na qualidade do ar antes que prejudique a saúde humana ou o biótopo (Mezghani *et al.*, 2019). As plantas são ferramentas sensíveis para previsão e reconhecimento de estresses ambientais, possibilitando monitorar os riscos de um contaminante para comunidades vegetais usando a vegetação como bioindicador da qualidade do ambiente (Rezende-Silva *et al.*, 2019).

O impacto ambiental de compostos químicos como os agrotóxicos pode ser avaliado por meio de métodos de biomonitoramento, baseados na mensuração de características foliares de plantas bioindicadoras que expressam respostas características (biomarcadores) às concentrações tóxicas destes (Silva *et al.*, 2022; Souza; Guedes; Fontanetti, 2016).

A caracterização de uma espécie vegetal como bioindicador pode ser realizada através de diferentes biomarcadores foliares, incluindo sintomas visíveis, respostas bioquímicas, fisiológicas e morfoanatômicas aos contaminantes (Lima *et al.*, 2017). Alguns dos biomarcadores mais utilizados no biomonitoramento compreende: sintomas visuais de intoxicação, alterações na taxa fotossintética, condutância estomática, taxa de transpiração, conteúdo de pigmento fotossintético, acúmulo de ácido chiquímico (Cruz *et al.*, 2021, Freitas-Silva *et al.*, 2020), concentração de compostos fenólicos, proteínas, aminoácidos (Rezende-Silva *et al.*, 2019), atividades de catalase e ascorbato peroxidase (Silva *et al.*, 2022).

O biomonitoramento dos efeitos de herbicidas na vegetação natural torna-se essencial, tendo em vista o potencial impacto desses compostos químicos em espécies não-alvo (Freitas-Silva *et al.*, 2020), principalmente quando a expansão do uso da terra pelo homem coloca em ameaça a preservação da biodiversidade em ecossistemas terrestres (Domingos *et al.*, 2015).

### 3.6 *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert

*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., conhecida como canafístula, pertencente à família Fabaceae, apresenta ampla distribuição, desde o Estado da Bahia ao Rio Grande do Sul. Contudo, em alguns estados do país já é considerada ameaçada de extinção, com destaque para o estado de São Paulo (Muller *et al.*, 2020). Espécie heliófita, pioneira, está presente na floresta estacional decidual, floresta estacional semidecidual sub-montana e montana, incluindo Cerradão, Chaco e Pantanal (Menezes *et al.*, 2019).

A espécie apresenta rápido crescimento e rusticidade e é comumente encontrada em pastagens, ocupando clareiras e bordas de matas, além de apresentar aptidão para recomposição de áreas degradadas e preservação permanente (Carnevali *et al.*, 2016).

Esta espécie pode alcançar altura de 15-25 metros e é dotada de copa ampla, com tronco de 50-70 cm de diâmetro, possui folha alternas espiraladas, estipuladas, compostas bipinadas, com 12-20 pares de pinas, cada uma com 20-30 pares de foliólulos sésseis, ovalados, de base arredondada e ápice acuminado, coriáceos, de 0,5-0,8 cm de comprimento por 0,2-0,4 cm de largura (Lorenzi, 2008). *Peltophorum dubium* apresenta sistema radicular bem desenvolvido, sendo dificilmente tombada pelo vento (Carvalho, 2003).

O seu processo reprodutivo inicia-se com idade entre 8 e 12 anos, e seu florescimento ocorre de dezembro a fevereiro, com a maturação das sementes no período de abril a junho. A dispersão dos frutos é feita pelo vento, mas os frutos maduros permanecem na árvore por longo período, facilitando a atividade de colheita (Durigan *et al.*, 1997).

O fruto da canafístula é do tipo vagem, indeiscente e samaróide, com coloração castanho-escuro, e possui de uma a duas sementes. Suas sementes apresentam dormência decorrente da impermeabilidade do tegumento, característica comum entre as espécies da família Fabaceae (Bertolini; Debastian; Brun, 2015). Os frutos, quando maduros, colhidos das árvores, podem ser semeados diretamente, porém, dessa forma há possibilidade de formarem mudas defeituosas, sendo preferível extrair as sementes dos frutos (Lorenzi, 2008).

*Peltophorum dubium* é considerada de alto potencial para a produção de madeira em plantações comerciais, com produtividade média de 19,60 m<sup>3</sup>/ha/ano (Bertolini;

Debastian, Brun, 2015). Sua madeira destaca-se pela alta qualidade e resistência moderada ao apodrecimento, sendo utilizada principalmente na construção civil (Donadio; Demattê, 2000; Bassan et al., 2006). Sua madeira ainda tem uso potencial para produção de energia com alto poder calorífico (Eckert *et al.*, 2015) e potencial uso tintorial, a partir da extração de pigmento de cor vermelha da madeira que são utilizados na atividade de curtume (Reitz *et al.*, 1988).

A espécie apresenta outros usos potenciais, dentre estes, a ornamentação de avenidas, rodovias, praças, parques e jardins. Destaca-se por ter grande efeito ornamental, pela beleza de suas grandes panículas amarelas, sobressaindo de grandes folhas delicadamente penadas, produzindo belo efeito decorativo (Carvalho, 2003).

*Peltophorum dubium* classifica-se como uma espécie rara devido a redução da cobertura vegetal original e consequente fragmentação de remanescentes florestais (NAVI, 2016). Dada sua importância para a biodiversidade e potencial de uso para o homem há relatos de melhoramento e conservação genética desta espécie (Shimizu *et al.*, 1987).

No Brasil, *P. dubium* possui ocorrência nos principais estados com elevada atividade agrícola, como Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo (Carvalho, 2003; Lorenzi, 2008), sendo estes grandes produtores de soja, milho, café, eucalipto, pastagens e cana-de-açúcar (IBGE, 2022), culturas que no seu manejo exigem o uso de herbicidas. Esses estados apenas no ano de 2022 totalizaram em comercialização de ingrediente ativo de picloram 1,38 toneladas, enquanto para o glyphosate o total foi de 155,96 toneladas (IBAMA, 2022). Portanto, a ocorrência da espécie *P. dubium* próxima a essas áreas agrícolas pode torná-la suscetível de sofrer intoxicação provocada pela deriva dos herbicidas.

### 3.7 REFERÊNCIAS

ABREU, K. M. de. *et al.* Differential Tolerance of Four Tree Species to Glyphosate and Mesotrione Used in Agrosilvopastoral Systems. **New Forests**, v. 53, n. 5, p. 831–850, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11056-021-09889-4>

ARCAUTE, C. R.; LARRAMENDY, M. L.; SOLONESKI, S. Genotoxicity by long-term exposure to the auxinic herbicides 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and dicamba on *Cnesterodon decemmaculatus* (Pisces: Poeciliidae). **Environmental Pollution**, v. 243, p. 670–78, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.040>

AZZAZY, M. F. Plant Bioindicators of Pollution in Sadat City, Western Nile Delta, Egypt. **PLOS ONE**, organizado por Sartaj Ahmad Bhat, v. 15, n. 3, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0226315>

AGROFIT (Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários). **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil**. 2024. Disponível em: [https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons). Acesso em: 14 set. 2023.

BARROS, R. E. *et al.* Impacts of the addition of biochar, biosolid and aluminum silicate on the leaching and bioavailability of 2,4-D + picloram in soil. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101682>

BASSAN, J. S. *et al.* Oxidação fenólica, tipo de explante e meios de cultura no estabelecimento in vitro de canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.). **Ciência Florestal**, v. 16, n. 4, p. 381–390, 2006. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980500981919>

BATISTA, P. F. *et al.* *Pouteria torta*: a native species of the Brazilian Cerrado as a bioindicator of glyphosate action. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 2, p. 296–305, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.07416>

BELO, M. S. da S. P. *et al.* Uso de agrotóxicos na produção de soja do estado do Mato Grosso: um estudo preliminar de riscos ocupacionais e ambientais. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 37, n. 125, p. 78–88, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0303-76572012000100011>

BERTOLINI, Í. C.; DEBASTIANI, A. B.; BRUN, E. J. Caracterização Silvicultural da Canafístula (*Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert). **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 14, n. 2, p. 67–76, 2015. DOI: [https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap\\_v14n2p67-76](https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap_v14n2p67-76)

BORGES, M. P. da S. *et al.* 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, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144113>

BOUTIN, C. *et al.* Herbicide Impact on Non-Target Plant Reproduction: What Are the Toxicological and Ecological Implications. **Environmental Pollution**, v. 185, p. 295–

306, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.10.009>

BRAGA, R. R. *et al.* Effect of growing *Brachiria brizantha* on phytoremediation of picloram under different pH environments. **Ecological Engineering**, v. 94, p. 102–106, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.05.050>

BUENO, M. R.; CUNHA, J. P. A. R. Environmental risk for aquatic and terrestrial organisms associated with drift from pesticides used in soybean crops. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 1, p. 1-16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020181245>

BURTON, M. A. S. Plants and the environment | Plants as Pollution Monitors. **Encyclopedia of Applied Plant Sciences**, p. 765–772, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1016/B0-12-227050-9/00225-8>

CARNEVALI, N. H. de S. *et al.* Sobrevivência e crescimento inicial de espécies arbóreas nativas implantadas em pastagem degradada. **FLORESTA**, v. 46, n. 2, p. 277-286, 2016 DOI: <https://doi.org/10.5380/ufv.v46i2.42881>

CARVALHO, G. P. *et al.* Growth analysis of hybrid *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* x *E. urophylla*) in response to simulated drift of auxinic herbicides. **Revista Árvore**, v. 42, n. 1, p. 1-9, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-90882018000100007>

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Embrapa Informação Tecnológica & Embrapa Florestas, Brasília/Colombo, Brasil, v.1, p. 1039, 2003. Disponível em: <https://www.embrapa.br/florestas/publicacoes/especies-arboreas-brasileiras>. Acesso em: 02 nov. 2023.

CEDERLUND, H. Effects of Spray Drift of Glyphosate on Nontarget Terrestrial Plants-A Critical Review: Effects of Spray Drift of Glyphosate on Nontarget Plants. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 36, n. 11, p. 2879–2886, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3925>

COELHO, A. J. P. *et al.* Effects of Anthropogenic Disturbances on Biodiversity and Biomass Stock of Cerrado, the Brazilian Savanna. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 11, p. 3151–3168, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02013-6>

COLLI, G. R.; VIEIRA, C. R.; DIANESE, J. C. Biodiversity and Conservation of the Cerrado: Recent Advances and Old Challenges. **Biodiversity and Conservation**, v. 29, n. 5, p. 1465–1475, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01967-x>

COOPER, J.; DOBSON, H. The Benefits of Pesticides to Mankind and the Environment. **Crop Protection**, v. 26, n. 9, p. 1337–1348, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.03.022>

COSTA, A. C. P. R. da. *et al.* Efeito da deriva simulada de glyphosate em diferentes partes da planta de *Eucalyptus grandis*. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 5, p. 1663–1672, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n5p1663>

CRUZ, C. E. S. *et al.* Physiological and Morphoanatomical Effects of Glyphosate in

*Eugenia Uniflora*, a Brazilian Plant Species Native to the Atlantic Forest Biome. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 17, p. 21334–21346, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12003-4>

DIAS, L. C. C.; MOSCHINI, L. E.; TREVISAN, D. P. A Influência das Atividades Antrópicas na Paisagem da Área de Proteção Ambiental Estadual do Rio Pandeiros, MG - Brasil. **Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 6, n. 2, p. 85-105, 2017. DOI: <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2017v6i2.p85-105>

DOMINGOS, M. *et al.* Searching for Native Tree Species and Respective Potential Biomarkers for Future Assessment of Pollution Effects on the Highly Diverse Atlantic Forest in SE-Brazil. **Environmental Pollution**, v. 202, p. 85–95, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.03.018>

DONADIO, N. M. M.; DEMATTÊ, M. E. S. P. Morfologia de frutos, sementes e plântulas de canafístula (*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub.) e jacarandá-da-Bahia (*Dalbergia nigra* (Vell.) Fr. All. ex Benth.) – Fabaceae. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 22, n. 1, p. 64–73, 2000. DOI: <https://doi.org/10.17801/0101-3122/rbs.v22n1p64-73>

DOS SANTOS, L. O. G. *et al.* Effect of Liming on Hexazinone Sorption and Desorption Behavior in Various Soils. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 9, p. 1183–1195, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1557323>

DUMANCAS, G. G. Picloram. **Encyclopedia of Toxicology (Third Edition)**, p. 948–951, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386454-3.00185-8>

DURIGAN, G. *et al.* Sementes e mudas de árvores tropicais. **Páginas e Letras Editoras Gráficas**, São Paulo, 1997. Disponível em: [https://www.infraestruturameioambientesp.gov.br/institutoflorestal/wpcontent/uploads/sites/234/2014/01/Sementes\\_e\\_Mudas\\_Arvores\\_Tropicais\\_hq.pdf](https://www.infraestruturameioambientesp.gov.br/institutoflorestal/wpcontent/uploads/sites/234/2014/01/Sementes_e_Mudas_Arvores_Tropicais_hq.pdf). Acesso em: 22 out. 2023.

SPADOTTO, C. A.; GOMES, M. A. F. Agrotóxicos no Brasil. Brasília: Embrapa Agricultura e Meio Ambiente, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agricultura-e-meio-ambiente/qualidade/dinamica/agrotoxicos-no-brasil>. Acesso em: 09 set. 2023.

ECEIZA, M. V. *et al.* The moderate oxidative stress induced by glyphosate is not detected in *Amaranthus palmeri* plants overexpressing EPSPS. **Journal of Plant Physiology**, v. 274, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2022.153720>

ECKERT, C. T. *et al.* Potencial dendroenergético da espécie *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Canafístula) para produção de biocombustíveis sólidos. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, n. 1, p. 42-53, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5380/rber.v4i1.38910>

FERRAZ-ALMEIDA, R.; MOTA, R. P. da. Routes of soil uses and conversions with the main crops in brazilian Cerrado: a scenario from 2000 to 2020. **Land**, v. 10, p. 1-16, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/land10111135>

FERREIRA, M. G. *et al.* Development of native forest species of the Atlantic forest in soil contaminated with hormonal herbicides. **International Journal of Phytoremediation**, v. 21, n. 9, p. 921–927, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1583636>

FIPKE, M. V.; VIDAL, R. A. Influence of Density and Development Stage of Ryegrass on Glyphosate Effectiveness. **Planta Daninha**, v. 37, p. 1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-83582019370100025>

FLORENCIA, F. M. *et al.* Effects of the Herbicide Glyphosate on Non-Target Plant Native Species from Chaco Forest (Argentina). **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 144, p. 360–368, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.049>

FREITAS-SILVA, L. *et al.* Evaluation of Morphological and Metabolic Responses to Glyphosate Exposure in Two Neotropical Plant Species. **Ecological Indicators**, v. 113, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106246>

GROSSMANN, K. Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. **Pest Management Science**, v. 66, n. 2, p. 113–120, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.1860>

HEAP, I. Global Perspective of Herbicide-Resistant Weeds. **Pest Management Science**, v. 70, n. 9, p. 1306–1315, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3696>

IBAMA. **Painéis de informações de agrotóxicos. 2022.** Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/quimicos-e-biologicos/agrotoxicos/paineis-de-informacoes-de-agrotoxicos/paineis-de-informacoes-de-agrotoxicos#Painel-comercializacao>. Acesso em: 08. Nov. 2022.

IBGE. **Produção Agropecuária. 2022.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explic/a/producao-agropecuaria/sp>. Acesso em: 08. Nov. 2022.

KOCADAL, k. *et al.* A review on advances and perspectives of glyphosate determination: challenges and opportunities. **Archives of Environmental Protection**, v. 48, n. 3, p. 89-98, 2023. DOI: <https://doi.org/10.24425/aep.2022.142693>

LIMA, D. A. *et al.* Morphoanatomical and Physiological Changes in *Bauhinia Variegata* L. as Indicators of Herbicide Diuron Action. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 141, p. 242–250, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.038>

LOPES, J. C. de S. *et al.* Extraction Method for Determining Florpyrauxifen-Benzyl Herbicide in Rice. **Food Analytical Methods**, v. 17, n. 2, p. 322–331, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12161-023-02569-3>

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**, v. 1, 5<sup>o</sup> ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, p. 352, 2008.

LUCADAMO, L.; CORAPI, A.; GALLO, L. Evaluation of Glyphosate Drift and Anthropogenic Atmospheric Trace Elements Contamination by Means of Lichen Transplants in a Southern Italian Agricultural District. **Air Quality, Atmosphere & Health**, v. 11, n. 3, p. 325–339, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0547-7>

MACHADO, V. M. *et al.* Sensibilidade de mudas de espécies florestais nativas ao glyphosate. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 6, p. 1941–1951, 2013. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/22329>

MAQUEDA, C. *et al.* Behaviour of Glyphosate in a Reservoir and the Surrounding Agricultural Soils. **Science of The Total Environment**, v. 593–594, p. 787–795, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.202>

MARTINEZ, D. A.; LOENING, U. E.; GRAHAM, M. C. Impacts of Glyphosate-Based Herbicides on Disease Resistance and Health of Crops: A Review. **Environmental Sciences Europe**, v. 30, n. 1, p. 1-14, 2018 DOI: <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0131-7>

MENEZES, E. S. *et al.* Crescimento de mudas de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. sob interferência de plantas espontâneas e forrageiras. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 4, n. 2, p. 153-159, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/biofix.v4i2.65897>

MEZGHANI, I. *et al.* Mulberry leaves as a bioindicator of fluoride pollution in the vicinity of a phosphate fertilizer factory located in Sfax, Tunisia. *Fluoride*, v. 52, n. 4, p. 537-545, 2019. <https://www.fluorideresearch.online/epub/files/051.pdf>

MONQUERO, P. A. *et al.* Initial growth of tree species under herbicide drift. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 59, n. 2, p. 162–172, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4322/rca.2197>

MOORE, D. R. J. *et al.* A field spray drift study to determine the downwind effects of isoxaflutole herbicide to nontarget plants. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 18, n. 3, p. 757-769, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/ieam.4508>

MÜLLER, E. M. *et al.* Anatomia e fisiologia de sementes de *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. submetidas ao armazenamento. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 3, p. 644–657, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509824540>

MWAKALESI, A. J.; POTTER, I. D. Removal of picloram herbicide from an aqueous environment using polymer inclusion membranes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103936>

NATH, C. P. *et al.* Challenges and alternatives of herbicide-based weed management. **Agronomy**, v. 14, n. 1, p. 1-21, 2024 DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy14010126>

NAVI, A. C. O. N. **Estudo de espécies arbóreas ameaçadas de extinção no Parque do Ingá, Maringá-PR**. 2016. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Estadual de Maringá.

NIZ, A. I. S. *et al.* Control of broadleaf and grass weeds in *Saccharum officinarum* with the use of pre-emergence herbicides. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 41, p. 2232–2238, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13402>

NOVOTNY, E. Glyphosate, Roundup and the Failures of Regulatory Assessment. **Toxics**, v. 10, n. 6, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxics10060321>

OFOSU, R. *et al.* Herbicide resistance: managing weeds in a changing world. **Agronomy**. v. 13, n. 6, p. 1-16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13061595>

OLSZYK, D. *et al.* Plant reproduction is altered by simulated herbicide drift to constructed plant communities. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v. 36, n. 10, p. 2799–2813, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/etc.3839>

PARMAR, T. K.; RAWTANI, D.; AGRAWAL, Y. K. Bioindicators: The Natural Indicator of Environmental Pollution. **Frontiers in Life Science**, v. 9, n. 2, p. 110–118, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/21553769.2016.1162753>

PASSOS, A. B. R. J. *et al.* Effects of Liming and *Urochloa Brizantha* Management on Leaching Potential of Picloram. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 230, n. 12, p. 1-8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4062-0>

PERCIVAL, G. C. The Influence of Glyphosate on Carotenoid Pigments, Reactive Oxygen Species Scavenging Enzymes and Secondary Stress Metabolites within Leaf Tissue of Three Acer Species. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 24, p. 19–25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.018>

PEREIRA, M. R. R. *et al.* Subdoses de glyphosate no desenvolvimento de espécies arbóreas nativas. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 326–332, 2015. DOI: <https://doi.org/10.14393/bj-v31n2a2015-21924>

PEREIRA, K. D. *et al.* Morphological and physiological changes on *Schizolobium parahyba* var. *Amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby plants intoxicated by glyphosate. **Cerne**, v. 23, n. 2, p. 267–274, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/01047760201723022316>

RAI, P. K. Impacts of Particulate Matter Pollution on Plants: Implications for Environmental Biomonitoring. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 129, p. 120–136, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.03.012>

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Projeto madeira do Rio Grande do Sul**. Herbário Barbosa Rodrigues (HBR)/Sudesul, 1988. p. 3-525.

REZENDE-SILVA, S. L. *et al.* *Pouteria torta* is a remarkable native plant for

biomonitoring the glyphosate effects on Cerrado vegetation. **Ecological Indicators**, v. 102, p. 497–506, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.003>

RIVAS-GARCIA, T. *et al.* Overview of environmental and health effects related to glyphosate usage. **Sustainability**. v. 14, n. 11, p. 1-14, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14116868>

RODRIGUES, B. N.; ALMEIDA, F. S. de. **Guia de herbicidas** 6 ed. Londrina: Edição dos autores. p. 764, 2011.

SAMSIDAR, A.; SIDDIQUEE, S.; SHAARANI, S. A Review of extraction, analytical and advanced methods for determination of pesticides in environment and foodstuffs. **Trends in Food Science & Technology**, v. 71, p. 188–201, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.011>

SANCHES-NETO, F. O. *et al.* Aqueous picloram degradation by hydroxyl radicals: Unveiling mechanism, kinetics, and ecotoxicity through experimental and theoretical approaches. **Chemosphere**, v. 278, p. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130401>

SANTOS, G. L. dos. *et al.* Degradation of the brazilian cerrado: interactions with human disturbance and environmental variables. **Forest Ecology and Management**, v. 482, p. 1-11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118875>

SANTOS, L. B. O.; MASINI, J. C. Determination of picloram in natural waters employing sequential injection square wave voltammetry using the hanging mercury drop electrode. **Talanta**, v. 72, n. 3, p. 1023–1029, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.12.030>

SANTOS, S. A. *et al.* Differential tolerance of clones of *Eucalyptus grandis* exposed to drift of the herbicides carfentrazone-ethyl and glyphosate. **Planta Daninha**, v. 37, p. 1-10, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-83582019370100024>

SEILER, L. K.; DECOTEAU, D. R.; DAVIS, D. D. Evaluation of *Ailanthus Altissima* as a bioindicator to detect phytotoxic levels of ozone. **Northeastern Naturalist**, v. 21, n. 4, p. 541–553, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1656/045.021.0405>

SOUZA, C. P.; GUEDES, T. A.; FONTANETTI, C. S. Evaluation of Herbicides Action on Plant Bioindicators by Genetic Biomarkers: A Review. **Environmental Monitoring and Assessment**, vol. 188, nº 12, novembro de 2016, p. 694. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5702-8>

SHIMIZU, J. Y. *et al.* Variações inter e intrapopulacionais em Canafístula. **Boletim de Pesquisa Florestal**, n. 14, p. 19-27, 1987. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPF-2009-09/4991/1/shimizu1.pdf>

SILVA, F. B. *et al.* Searching for biomarkers of early detection of 2,4-D effects in a native tree species from the brazilian Cerrado biome. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v. 57, n. 1, p. 71–80, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2028528>

SILVA, L. Q. *et al.* Modificações fisiológicas em folhas de pequi (*Caryocar brasiliense*) causadas pela aplicação de glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 15, n. 2, p. 184-194, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7824/rbh.v15i2.472>

SILVA, T. S.; RANDO, J.G.; CARVALHO, D. A. S. ***Peltophorum in Flora e Funga do Brasil 2023***. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB83567>. Acesso em: 28 nov. 2023.

SILVA, T. S. *et al.* Use of neural networks to estimate the sorption and desorption coefficients of herbicides: a case study of diuron, hexazinone, and sulfometuron-methyl in Brazil. **Chemosphere**, v. 236, p. 1-15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.064>

SINGH, S. *et al.* Glyphosate uptake, translocation, resistance emergence in crops, analytical monitoring, toxicity and degradation: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 18, n. 3, p. 663–702, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00969-z>

SZÉKÁCS, A.; DARVAS, B. **Forty years with glyphosate. Herbicides-properties, synthesis and control of weeds**, v. 14, p. 247-284, 2012.

TIBURCIO, R. A. S. *et al.* Crescimento de mudas de clones de eucalipto submetidos à deriva simulada de diferentes herbicidas. **Revista Árvore**, v. 36, n. 1, p. 65–73, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000100008>

TUFFI SANTOS, L. D. *et al.* Crescimento do eucalipto sob efeito da deriva de glyphosate. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 133–137, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000100014>

TUFFI SANTOS, L. D. *et al.* Crescimento e morfoanatomia foliar de eucalipto sob efeito de deriva do glyphosate. **Planta Daninha**, v. 23, n. 1, p. 133–142, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000100016>

TUFFI SANTOS, L. D. *et al.* Danos visuais e anatômicos causados pelo glyphosate em folhas de *Eucalyptus grandis*. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 9–16, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582008000100002>

TUFFI SANTOS, L. D. *et al.* Intoxicação de eucalipto submetido à deriva simulada de diferentes herbicidas. **Planta Daninha**, v. 24, n. 3, p. 521–526, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000300014>

VIEIRA, B. C. *et al.* Herbicide drift exposure leads to reduced herbicide sensitivity in *Amaranthus* Spp. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59126-9>

YADAV, T. *et al.* Weed management in cowpea-a review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 2, p. 1375 – 1385, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.602.156>

YAMADA, T.; CASTRO, P. R. C. Efeitos do glyphosate nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. Encarte técnico: **Informações Agronômicas**, n. 119, p. 1-32, 2007. Disponível em: [http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/737cd8a86525a2ec83257aa1005fe1b9/\\$file/encarte-119.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/737cd8a86525a2ec83257aa1005fe1b9/$file/encarte-119.pdf). Acesso em: 04 set. 2023.

YANG, Z. *et al.* Determination of eight herbicide residues in foodstuffs of plant origin by gas chromatography–atmospheric pressure chemical ionization–tandem mass spectrometry. **Microchemical Journal**, v. 193, p. 1-10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2023.109130>

ZAMPIROLI, R.; CUNHA, J. P. A. R.; ALVARENGA, C. B. de. Simulated drift of dicamba and glyphosate on coffee crop. **Plants**, v. 12, n. 20, p. 1-15, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants12203525>

## **4 ARTIGOS**

### **4.1 Artigo 1 - Deriva do picloram em *Peltophorum dubium*, uma espécie nativa do Cerrado brasileiro**

Este artigo foi elaborado conforme normas da Revista Environmental Science and Pollution Research.

## Deriva do picloram em *Peltophorum dubium*, uma espécie nativa do Cerrado brasileiro

**Resumo:** A deriva pode levar ao contato indesejado de herbicidas a organismos não-alvo, incluindo as plantas presentes em áreas de preservação no entorno de cultivos agrícolas. Uma espécie de ocorrência frequente em áreas próximas da atividade agrícola é a *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub., fator que a torna uma espécie vulnerável a contaminação pela deriva do picloram, herbicida amplamente empregado em pastagens, cana-de-açúcar, arroz e na erradicação de tocos de eucalipto na reforma de áreas florestais. Este estudo objetivou avaliar os efeitos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos provocados pela deriva de picloram em *P. dubium*, bem como o seu uso potencial como bioindicador da deriva desse herbicida. As doses aplicadas em simulação à deriva do herbicida corresponderam a 19,2; 38,4; 76,8; 153,6; 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram e a testemunha. Os principais sintomas de intoxicação observados nas plantas foram epinastia das folhas, retorcimento do ápice do caule, clorose foliar e, nas maiores doses, necroses foliares e do caule e senescência foliar. Aos 45 dias após aplicação houve a morte total das plantas nas maiores doses aplicadas. Nas características fisiológicas, a deriva simulada de picloram na maior dose, ocasionou redução de 52,86% na taxa fotossintética, 42,51% na taxa de transpiração e 64,28% na condutância estomática em relação a testemunha. A deriva de picloram na dose de 19,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> ocasionou queda acentuada na proteína das plantas e nos teores, conteúdo e na utilização do N. Portanto, a espécie possui potencial como bioindicador de picloram no meio ambiente, podendo ser usada no biomonitoramento da ocorrência da deriva do herbicida em áreas próximas aos cultivos agrícolas.

**Palavras-chave:** nitrogênio, clorose, necrose, epinastia, espécie não-alvo, mimetizadores de auxinas, biomonitoramento, bioindicador.

## Picloram drift in *Peltophorum dubium*, a specie native to the Brazilian Cerrado

**Abstract:** Drift can lead to unwanted contact between herbicides and non-target organisms, including plants present in conservation areas around agricultural crops. *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. is a frequently occurring species in areas close to agricultural activity, which makes it vulnerable to contamination by picloram drift, an herbicide widely used in pastures, sugar cane, rice and in the eradication of eucalyptus stumps in the reform of forest areas. This study aimed to evaluate the morphological, physiological and biochemical effects caused by picloram drift on *P. dubium*, as well as its potential use as a bioindicator of herbicide drift. The doses applied in simulation of herbicide drift corresponded to 19.2; 38.4; 76.8; 153.6; 307.2 g e. a. ha<sup>-1</sup> of picloram and the control. The main intoxication symptoms observed in the plants were leaf epinasty, twisting of the stem apex, leaf chlorosis and, at the highest doses, leaf and stem necrosis and leaf senescence. At 45 days after application, the plants died completely at the highest doses applied. In terms of physiological characteristics, simulated picloram drift at the highest dose caused a 52.86% reduction in photosynthetic rate, 42.51% in transpiration rate and 64.28% in stomatal conductance compared to the control. Picloram drift at a dose of 19.2 g a. e. ha<sup>-1</sup> caused a sharp drop in N content, N content, protein and N utilization. Therefore, the species has potential as a bioindicator of picloram in the environment and can be used to biomonitor the occurrence of herbicide drift in areas close to agricultural crops.

**Keywords:** nitrogen, chlorosis, necrosis, epinasty, non-target species, auxin mimickers, biomonitoring, bioindicator.

## INTRODUÇÃO

No Cerrado, os dois maiores tipos de uso da terra correspondem a pastagem com 29,3% e agricultura com 15,9% (Embrapa 2020). Somente no ano de 2022, o Cerrado abrigava mais de 50 milhões de hectares de pastagens cultivadas, que correspondiam a 31,25% do total de pastagens do Brasil (Mapbiomas 2023). Herbicidas do grupo do ácido piridinocarboxílico, como o picloram, são os mais recomendados e utilizados em pastagens no Brasil (Agrofit 2024).

A exploração agrícola nessa região acarreta a formação de áreas nativas altamente fragmentadas (Adarme et al. 2020) e em interação direta com as áreas cultivadas. O uso extensivo e indiscriminado de agrotóxicos nessas áreas agrícolas causa preocupação devido à proximidade dos fragmentos florestais, tornando essas áreas expostas à contaminação por herbicidas (Freitas-Silva et al. 2020). Esses fragmentos florestais limítrofes a áreas agrícolas estão em risco constante de sofrerem impactos decorrente do processo de deriva de herbicidas (Borges et al. 2021), incluindo o picloram que intoxica espécies arbóreas nativas não-alvo (Monquero et al. 2016).

O herbicida picloram faz parte do grupo de herbicidas mimetizadores de auxinas, utilizados no controle de dicotiledôneas herbáceas e perenes (Song 2014) em pastagens (Passos et al. 2019; Agrofit 2024), cana-de-açúcar, arroz e na erradicação de tocos de eucalipto na reforma de áreas florestais (Agrofit 2024).

O picloram (ácido 4-amino-3,5,6-tricloro-2-piridinocarboxílico) é um herbicida piridínico de baixa degradação no ambiente, derivado clorado do ácido picolínico. Atua mimetizando o hormônio ácido indolacético ou auxinas naturais de plantas,

interferindo na ação da enzima RNA-polimerase e conseqüentemente na síntese dos ácidos nucleicos e proteínas (Santos & Masini 2007), induzindo intensa proliferação celular em tecidos, causando epinastia de folhas e caule, além de interrupção do floema, impedindo o movimento dos fotoassimilados das folhas para o sistema radicular, causando a morte da planta (Mwakalesi & Potter 2020).

Pesquisas que indiquem o impacto do picloram em espécies não-alvo do Cerrado ainda são escassas. Dessa forma, é essencial obter informações sobre as respostas da vegetação do Cerrado às aplicações de picloram e identificar estratégias que permitam mitigar, proteger e conservar este bioma e suas espécies dos impactos decorrentes do contato indesejado com este herbicida. O biomonitoramento ambiental a partir do uso de plantas bioindicadoras sensíveis ao estresse ambiental de interesse tem-se tornado uma alternativa para a compreensão dos efeitos potenciais de substâncias tóxicas em plantas não-alvo (Camilo-Cotrim et al. 2022; Rodrigues et al. 2020; Rezende-Silva et al. 2019; Ratola et al. 2014).

A determinação de uma espécie vegetal como bioindicador é baseada em um conjunto de respostas expressas pela planta quando exposta a um agente estressor. Essas respostas são definidas como biomarcadores, podendo ser sintomas foliares visíveis, respostas bioquímicas, fisiológicas e morfoanatômicas aos poluentes (Rodrigues et al., 2020; Silva et al. 2022).

Dentre as diversas espécies nativas do bioma Cerrado, *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub pertencente à família Fabaceae, possui ampla distribuição nesse bioma (Silva et al. 2023), cumprindo, portanto, requisito para ser avaliada como espécie bioindicadora (Seiler et al. 2014), apresentando dessa forma grande potencial de uso no biomonitoramento da ação de herbicidas.

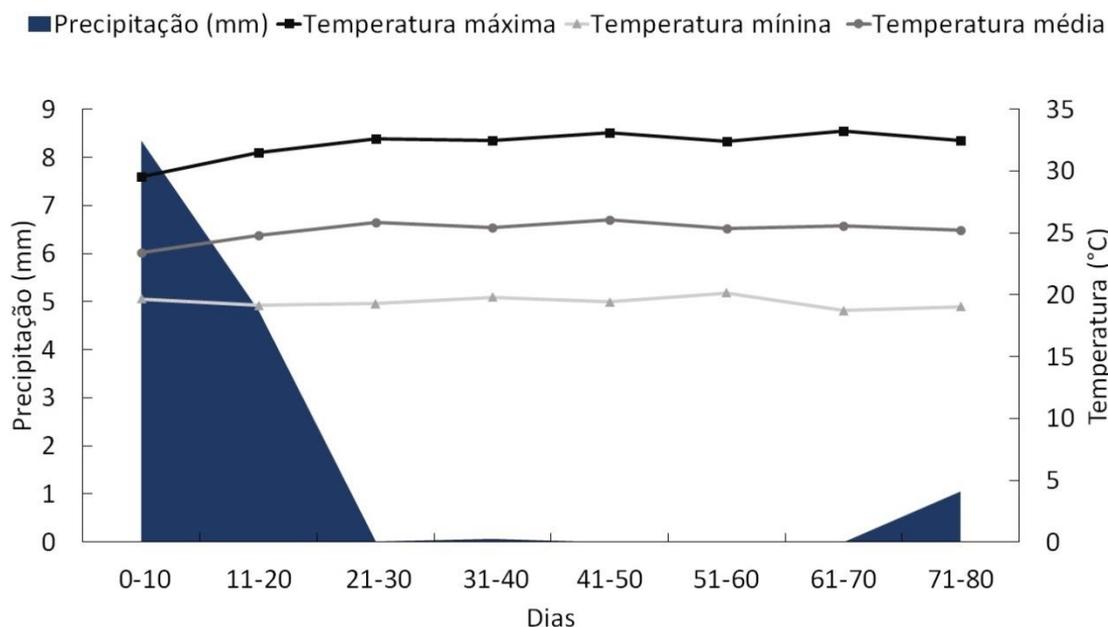
A hipótese levantada é de que a deriva de picloram causa impactos em espécies

não-alvo como *P. dubium*. Portanto, este estudo visa determinar os efeitos morfológicos, fisiológicos e bioquímicos provocados pela deriva de picloram em *P. dubium*, contribuindo com informações relativas aos riscos de exposição ao herbicida para a espécie, bem como o seu uso potencial como bioindicador. O desenvolvimento do estudo teve por motivação a preocupação de que partículas suspensas de herbicidas possam atingir áreas de matas nativas provocando a intoxicação de espécies não-alvo, afetando o equilíbrio ambiental dessas áreas. Espera-se que os resultados deste estudo possam gerar informações sobre os efeitos da deriva do herbicida picloram no crescimento e desenvolvimento de *P. dubium*. Sobretudo, subsidiar na adoção de medidas para minimizar os impactos da deriva de picloram na espécie estudada e avaliar o seu uso como bioindicador da ocorrência de contaminação por este herbicida.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Local do experimento e produção das mudas de *Peltophorum dubium***

O experimento foi instalado em bancadas a céu aberto em área pertencente ao Laboratório de Biologia e Manejo de Plantas Daninhas, no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), campus Montes Claros, MG. A área experimental está localizada na latitude 16°40'57,70" Sul, longitude 43°50'19,62" Oeste e apresenta altitude de 650 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, tropical com inverno seco e verão chuvoso (Climate-Data 2023). As médias decendiais de temperatura e de precipitação durante o período experimental são apresentadas na (Figura 1), e foram obtidas em estação meteorológica localizada a cerca de 675 m da área experimental.



**Figura 1.** Médias decendiais de temperaturas e precipitação do local de desenvolvimento do experimento, no período de janeiro a abril de 2023 entre o transplante das mudas ao final do experimento. Dados cedidos por estação meteorológica do INMET, localizada a cerca de 675 m da área experimental.

Para produção das mudas de *P. dubium* foram coletadas sementes de matrizes da espécie na Fazenda Experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro no ICA – UFMG. Após sua limpeza, as sementes foram secas à sombra e armazenadas durante 93 dias. Posteriormente, as sementes foram escarificadas mecanicamente e semeadas 3 sementes/tubetes de 290 cm<sup>3</sup>, contendo substrato e mantidos em bandejas de produção de mudas. O substrato utilizado era composto de 33,3% de moinha de carvão, 33,3% de esterco bovino curtido e 33,4% substrato comercial (BIOPLANT®), esse último composto de fibra de coco, casca de pinus, turfa de Sphagnum, vermiculita, casca de arroz e nutrientes. Como complemento foi realizado adubação de base com 75 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 15 g de K<sub>2</sub>O por metro cúbico de substrato. Após a emergência, foi realizado desbaste mantendo uma planta por tubete, sendo irrigados por cerca de 108 dias para a produção das mudas utilizadas no experimento. Durante o ciclo total de produção das mudas foram realizadas a cada 15 dias

adubação foliar com 10 g L<sup>-1</sup> de NPK 04:20:12.

Após o desenvolvimento das mudas e sua prévia seleção quanto a padronização em relação ao vigor e altura média de 43 cm, estas foram transplantadas para vasos de 12 litros preenchidos com substrato na proporção de 3:1:1 (solo: areia: esterco bovino). O solo utilizado foi coletado na camada arável, classificado como Cambissolo Háplico eutrófico de textura argilosa (Embrapa 2013), com as seguintes características físicas e químicas: pH em água: 6,1; areia: 63,2 dag kg<sup>-1</sup>; silte: 12,8 dag kg<sup>-1</sup>; argila: 24 dag kg<sup>-1</sup>; teor de matéria orgânica: 3,26 dag kg<sup>-1</sup>; P Mehlich-1: 8,1 mg dm<sup>-3</sup>; P remanescente: 21,6 mg L<sup>-1</sup>; K: 214,5 mg dm<sup>-3</sup>; Ca: 10,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg: 0,87 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al: 0,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al: 1,27 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB: 11,87 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; t : 11,87 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; m: 0,0%; T: 13,14 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V: 90,31% e Carbono Org.: 1,89 dag kg<sup>-1</sup>. No preparo do substrato para os vasos foi adicionado 10 kg m<sup>-3</sup> de NPK 4:30:10.

As mudas de *P. dubium* foram cultivadas nos vasos, mantendo-se o solo úmido, com irrigações diárias, conforme a necessidade das plantas, mantendo-se sempre a capacidade de campo entre 80 e 100%. As plantas receberam adubação de cobertura a cada quinze dias, com 3 g de ureia (45% de N) e 3 g de cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O) por vaso.

### **Delineamento Experimental e aplicação do herbicida**

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com 4 repetições. Cada vaso de 12 litros contendo uma planta de *P. dubium* caracterizava uma parcela experimental. As plantas foram submetidas à deriva simulada do herbicida, com a aplicação de subdoses de 19,2; 38,4; 76,8; 153,6 e 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram (Padron<sup>®</sup>, 240 g e. a L<sup>-1</sup> de picloram, Corteva Agriscience, USA), e a testemunha (sem aplicação do herbicida). A deriva foi simulada com subdoses e corresponderam a 2, 4, 8, 16 e 32% da dose de 980 g ha<sup>-1</sup> de picloram,

frequentemente usada em pastagens para o controle de plantas daninhas (Agrofit 2024).

A aplicação da calda herbicida foi realizada aos 40 dias após transplântio para os vasos, e as plantas apresentavam em média 43,25 cm de altura e 0,97 mm de diâmetro. Utilizou-se pulverizador costal manual (modelo PJH, Jacto do Brasil SA, Pompeia, Brasil), com capacidade de 20 litros e ponta de pulverização (modelo TTI11002, Teejet, Wheaton, Illinois, USA) e válvula reguladora de pressão constante a 200 kPa (modelo U7466.00, Guarany, Itu, Brasil), calibrado para aplicação de 116 L ha<sup>-1</sup> de calda.

A aplicação do herbicida foi realizada diretamente sobre as plantas e no momento da aplicação as condições ambientais apresentavam as seguintes características: velocidade do vento 3,3 km h<sup>-1</sup>, temperatura média 20,54 °C e umidade relativa do ar de 77,2%.

### **Avaliações fisiológicas**

Aos três dias após a aplicação (DAA) foram avaliadas a taxa fotossintética, condutância estomática, e a taxa de transpiração, usando analisador de gases no infravermelho - IRGA (modelo Lcpro-SD, Analytical Development, Hoddesdon, Reino Unido) com fonte de luz acoplada de 1200  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ . O rendimento quântico do fotossistema II ( $\Phi$  PSII) e a taxa de transporte de elétrons foram realizadas com auxílio do aparelho fluorômetro Y (II) meter (modelo PSK, Opti-Sciences, Hudson, USA). A medição de clorofila a e clorofila b foram realizadas com clorofilômetro (modelo CFL1030, Falker, Porto Alegre, Brasil). A eficiência instantânea do uso da água (EUA) foi calculada através da razão da fotossíntese pela transpiração. As avaliações foram realizadas no terço superior da planta em folha completamente expandida, entre 9 e 11h da manhã de forma a manter as condições ambientais mais homogêneas.

### **Avaliações morfológicas e de intoxicação**

As avaliações de intoxicação foram realizadas aos 7, 14, 21, 28 e 45 DAA por meio de escala de notas de 0 a 100%, onde 0% corresponde a ausência de sintomas visíveis e 100% a morte da planta (Frans et al. 1986). Foram utilizados três avaliadores para darem notas de intoxicação. Os valores por parcela foram determinados pela média aritmética das três observações. Os sintomas de intoxicação foram descritos e fotografados para o devido registro da ação do produto em plantas de *P. dubium*.

As plantas foram mensuradas quanto a sua altura (cm), considerando da superfície do solo até o ápice caulinar, com régua graduada, e diâmetro do caule (mm) a dois centímetros da superfície do solo, com paquímetro, aos 0 e 45 (DAA). O incremento em altura das mudas de *P. dubium* foi determinado pela fórmula (HF-HI), onde HI corresponde a primeira avaliação de altura e HF a última e o incremento em diâmetro pela fórmula (DF-DI), onde DI corresponde a primeira avaliação de diâmetro e DF a última.

Aos 45 DAA as plantas foram separadas em parte aérea (folhas e caule) e raiz e armazenadas em sacos de papel, mantidas em estufa com circulação de ar a 65°C até atingirem massa constante. Posteriormente, foram pesados e avaliados para determinação de massa seca da parte aérea, raízes e a massa seca total.

### **Avaliações de açúcares e amido**

Para determinação de açúcares e amido presente na parte aérea e raiz das plantas de *P. dubium* adotou-se a metodologia adaptada de McCready et al. (1950). Inicialmente as amostras foram moídas com auxílio de moinho tipo Willey (modelo CE-340/MACRO, Cienlab, Campinas, Brasil) com peneira de malha de 1 mm. Em uma fração de 0,2 g da amostra seca e moída foi adicionado 1,5 mL de etanol 80% em ebulição, para remoção de açúcares solúveis, mono, di e trissacarídeos. Em seguida,

as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por 10 min em centrífuga (modelo VS-15000CFN II, Vision Scientific, Daejeon, Coreia do Sul). Esse procedimento foi repetido por quatro vezes e os sobrenadantes foram coletados em balão volumétrico de 100 mL e completados com água destilada, onde foram reservados para análise de açúcares solúveis. O precipitado foi ressuspenso em 1,5 mL de ácido perclórico a 30%, agitado por 2 min em turbilhador e deixado em repouso por 30 min, seguido de centrifugação a 3000 rpm por 10 min. Esse procedimento foi repetido por três vezes. Os sobrenadantes foram coletados em balão volumétrico de 100 mL e completados com água destilada. A quantificação dos teores de amido e açúcares foi realizada pela reação com antrona (Fales 1951) em espectrofotômetro (modelo 1600 UV, Nova Instruments, Piracicaba, Brasil), com leituras em 620 nm.

### **Análise de nitrogênio, proteína, coeficiente de utilização biológica e eficiência de uso do nitrogênio**

A determinação do teor de nitrogênio (N) na raiz e na parte aérea foi realizada seguindo a metodologia de Kjeldahl (Bataglia et al. 1983), em que uma alíquota de 0,2 g do material moído foi submetida a digestão sulfúrica. A concentração de proteína na parte aérea foi determinada pela multiplicação do teor de nitrogênio na parte aérea pelo fator de conversão geral do nitrogênio em proteína de 6,25 (Villegas et al. 1985).

O conteúdo de nitrogênio foi obtido através da multiplicação da massa seca da parte aérea e massa seca da raiz das plantas pelo teor do nitrogênio contido na amostra de cada órgão da planta, respectivamente. Por fim, foram determinados os coeficientes de utilização biológica (CUB, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) (Equação 1), a eficiência de utilização do nitrogênio da planta na parte aérea (EUNPA, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) (Equação 2) e na raiz (EUNR, g<sup>2</sup> mg<sup>-1</sup>) (Equação 3) (Siddiqi & Glass 1981).

$$CUB = \frac{MST^2}{CTN} \quad (\text{Equação 1})$$

$$EUNPA = \frac{MSPA^2}{CTN} \quad (\text{Equação 2})$$

$$EUNR = \frac{MSR^2}{CTN} \quad (\text{Equação 3})$$

CUB: Coeficiente de utilização biológica do nitrogênio;

EUNPA: Eficiência de utilização do nitrogênio na parte aérea;

EUNR: Eficiência de utilização do nitrogênio na raiz;

MST: Matéria seca total;

MSPA: Matéria seca parte aérea;

MSR: Matéria seca da raiz;

CTN: Conteúdo total de nitrogênio na planta.

### **Análise dos dados e estatística**

Os sintomas de intoxicação causado pelo picloram em *P. dubium* foram apresentados de forma descritiva.

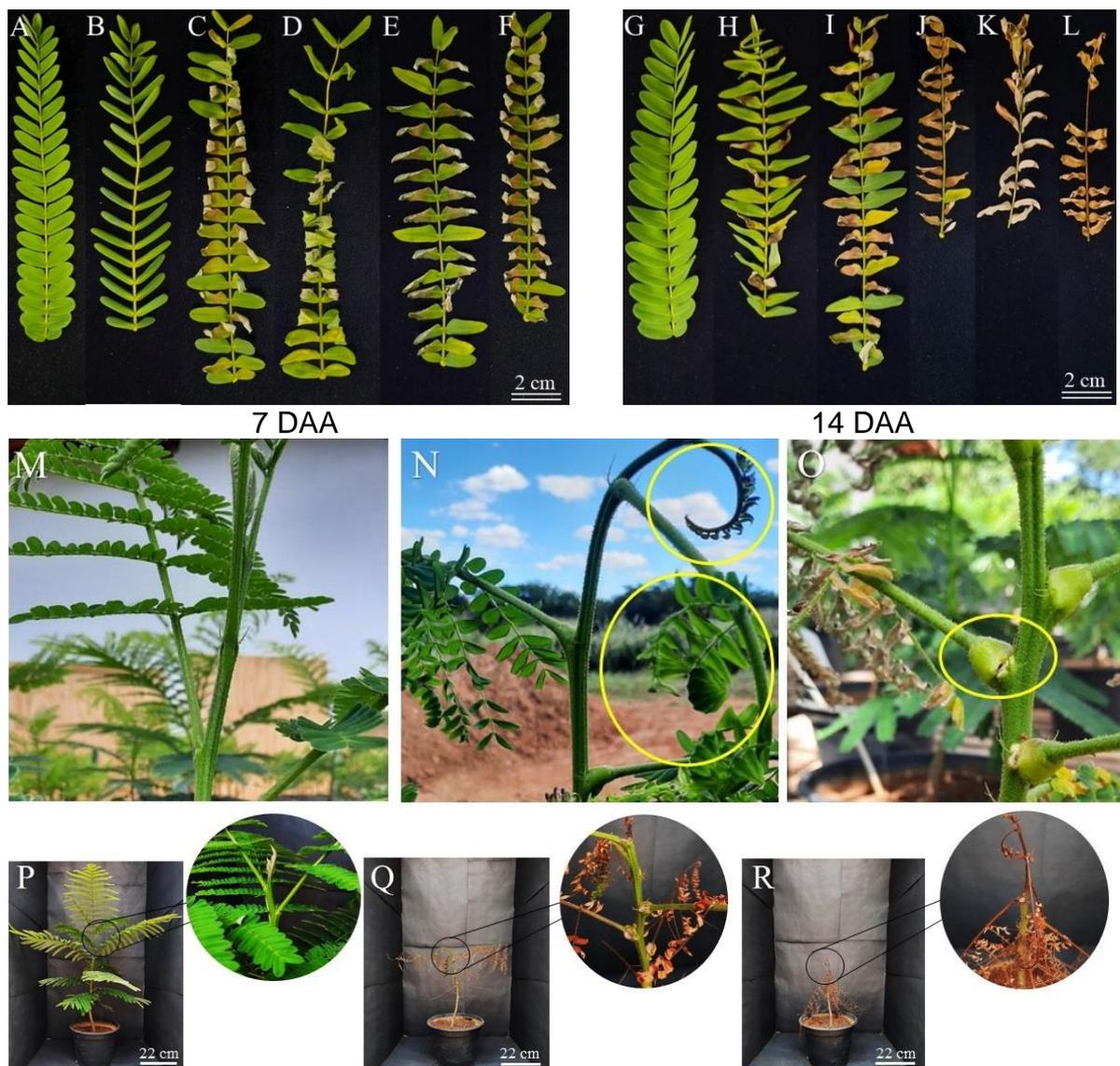
Os dados de incremento em altura e diâmetro, massa seca acumulada, taxa de intoxicação pelo herbicida, taxa fotossintética, transpiração, condutância estomática, acúmulo de açúcares e amido, teor e conteúdo de nitrogênio, proteínas, coeficiente de utilização biológica e eficiência de utilização do nitrogênio das plantas de *P. dubium*, submetidas à deriva do picloram foram submetidos à análise de variância, e quando significativo, ajustou-se regressões, ambos a 5% de probabilidade. No ajuste das regressões foram escolhidos modelos quanto ao ajuste biológico, a significância dos coeficientes das equações (a 1, 5 e 10% pelo teste t), e o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). As análises estatísticas do trabalho foram realizadas por meio do software R (R Core Team 2022).

## **RESULTADOS**

### **Sintomas de intoxicação de picloram em *Peltophorum dubium***

Plantas de *P. dubium* submetidas as subdoses de picloram, em deriva simulada, apresentam elevada sensibilidade a ação desse herbicida (Figura 2). Os sintomas de intoxicação observados foram amarelecimento e epinastia foliar, retorcimento do ápice

do caule, e, nas maiores doses, necroses foliares e caulinar e senescência das folhas (Figura 2 A - L), além de entumecimento e rompimento do pulvino (Figura 2 N – O). Os sintomas de intoxicação e os danos as plantas se intensificaram com o aumento das doses de picloram.

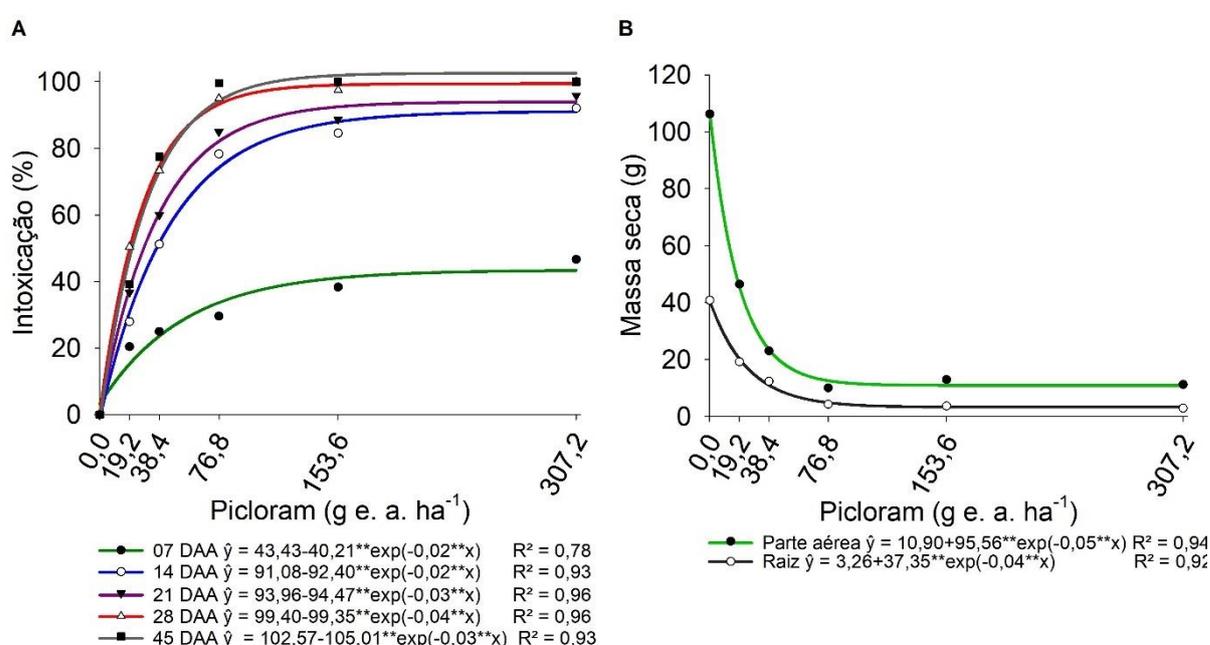


**Figura 2.** Sintomas de intoxicação em plantas de *Peltophorum dubium* aos 7 e 14 dias após aplicação (DAA) de subdoses de picloram em deriva simulada. (A) (G) Testemunha, (B) (H) 19,2 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (C) (I) 38,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (D) (J) 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (E) (K) 153,6 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (F) (L) 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup>. (M) Testemunha, (N) 38,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> - Círculo em amarelo: retorcimento do ápice caulinar e encarquilhamento de folhas, (O) 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> - Círculo em amarelo: entumecimento e rompimento do pulvino. Aspectos gerais aos 45 dias após aplicação de subdoses de picloram (P) Testemunha, (Q) 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (R) 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup>.

### Taxa de intoxicação e crescimento de *Peltophorum dubium* sob deriva de picloram

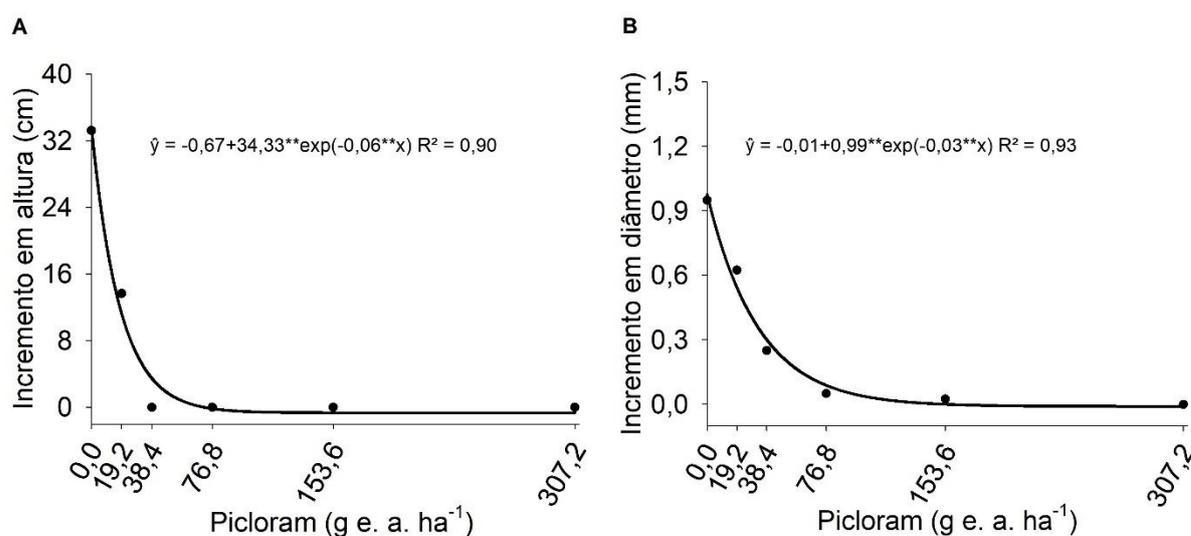
Aos 7 dias após aplicação (DAA) as plantas de *P. dubium* submetidas as doses de 153,6 e 307,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram apresentaram valores próximos de 40% de intoxicação. Com o decorrer do tempo a intoxicação das plantas foi aumentando e aos 45 (DAA) alcançou valores acima de 90% em plantas expostas a deriva de doses superiores a 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>, ocasionando a morte total das plantas nas maiores doses aplicadas (Figura 3A).

A massa seca acumulada da parte aérea e raiz das plantas foi drasticamente afetada pela deriva do picloram, com decréscimo acentuado com o aumento das doses. A partir da dose de 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> as plantas de *P. dubium* apresentaram massa seca da parte aérea e raiz inferiores a 20 g, o que representa decréscimo de 87,83 e 87,71% em relação à testemunha sem aplicação de herbicida, que apresentou acúmulo de massa seca da parte aérea e raiz de 106,27 e 40,82 g, respectivamente (Figura 3B).



**Figura 3.** Taxa de intoxicação (A) aos 7, 14, 21, 28 e 45 dias após aplicação e massa seca da parte aérea e raiz (B) de plantas de *Peltophorum dubium* submetidas a subdoses de picloram, em deriva simulada. \*\* significativo pelo teste t ( $p \leq 0,01$ ).

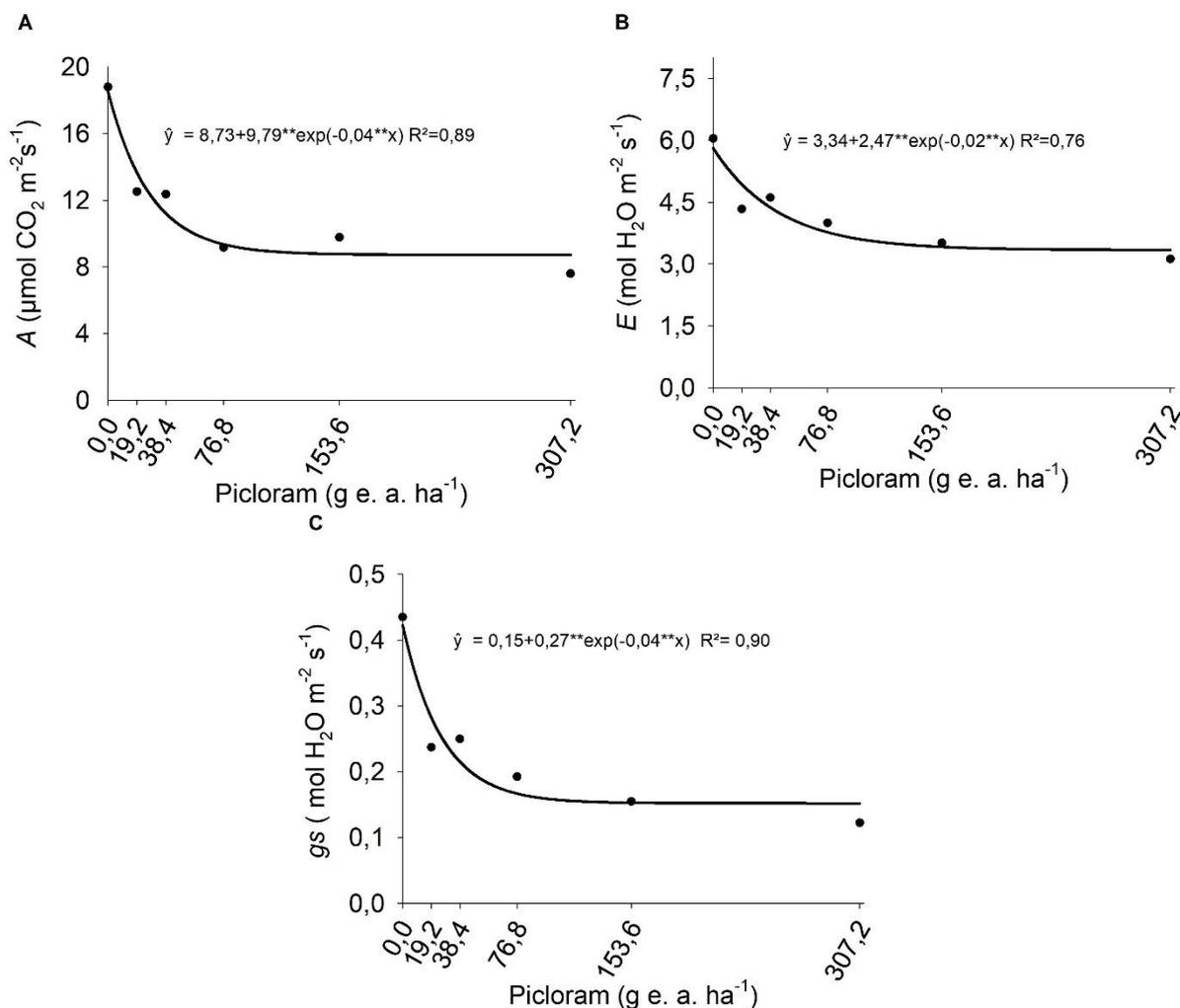
Plantas de *P. dubium* apresentaram forte redução do incremento em altura e em diâmetro do caule de acordo com aumento das doses até 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram (Figura 4 A e B). Na dose de 19,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> as plantas apresentaram incremento em altura 69,78% menor que a testemunha, sendo que as plantas tratadas a partir da dose de 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> apresentaram mínimos decréscimos (Figura 4A) após aplicação do herbicida. O incremento em diâmetro na menor dose foi 44,89% menor ao observado na testemunha, com mínimos decréscimos no incremento em diâmetro em plantas expostas a doses superiores a 153,6 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram (Figura 4B).



**Figura 4.** Incremento em altura (A) e incremento em diâmetro (B) em plantas de *Peltophorum dubium* submetidas à deriva simulada de picloram aos 45 dias após aplicação do herbicida. \*\* significativo pelo teste t ( $p \leq 0,01$ ).

### Resposta fisiológica e metabólica de *Peltophorum dubium* a deriva de picloram

A exposição de *P. dubium* à deriva simulada de picloram ocasionou redução na taxa fotossintética, taxa de transpiração e na condutância estomática com ajuste de modelos de regressão exponencial decrescente (Figura 5 A - C). A redução nas variáveis fisiológicas é acentuada nas primeiras doses do herbicida e tem mínimos decréscimos quando da aplicação de doses superiores a 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram (Figura 5 A - C).



**Figura 5.** A - Alterações na taxa fotossintética (A), B - condutância estomática (gs) e C - transpiração (E) em plantas de *Peltophorum dubium* expostas a subdoses do herbicida picloram, em deriva simulada. \*\* significativo pelo teste t ( $p \leq 0,01$ ).

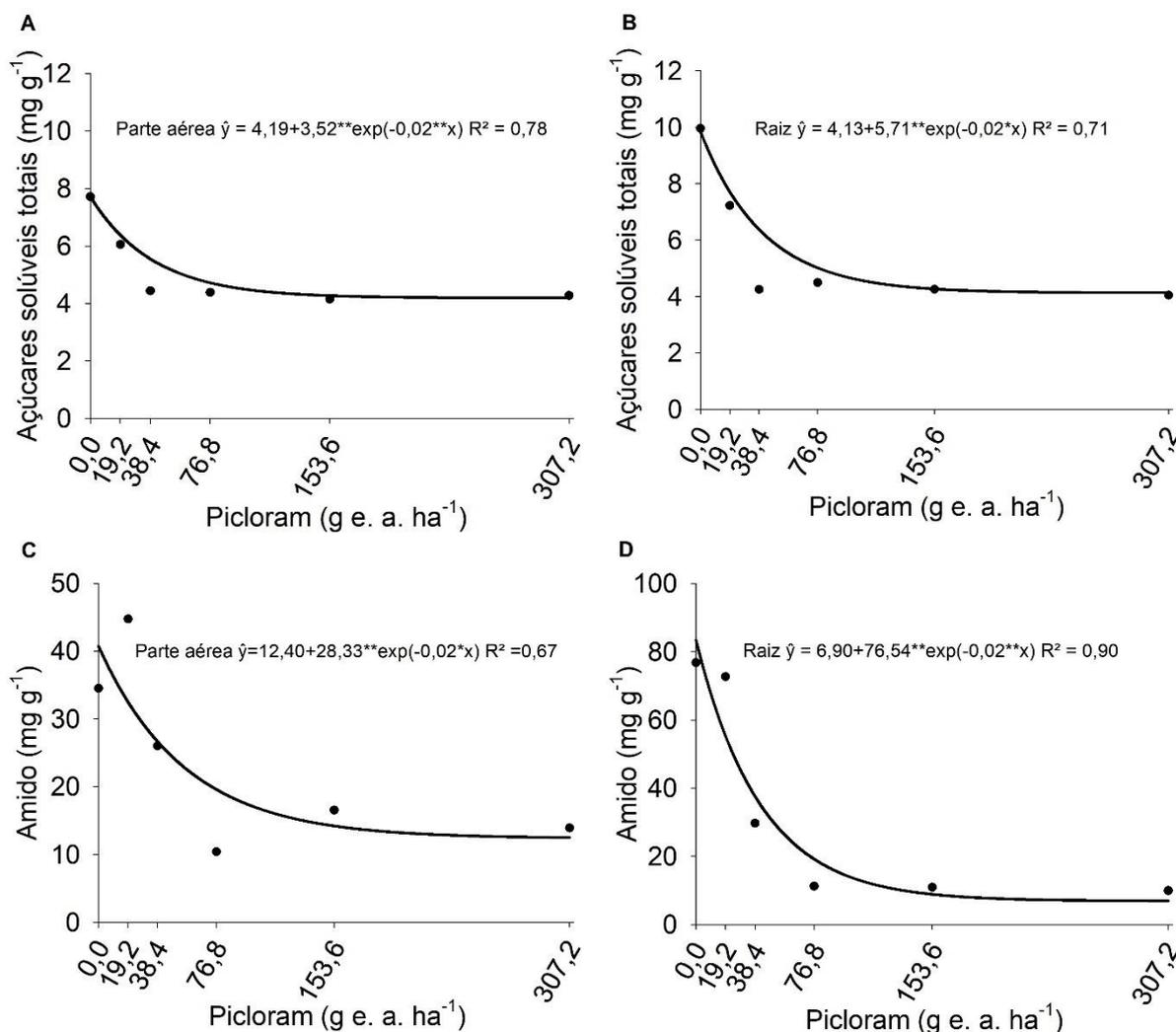
As variáveis eficiência de uso da água (EUA), rendimento do fotossistema PSII ( $\Phi$  PSII), taxa de transporte de elétrons (ETR), clorofila a e clorofila b não apresentaram ajuste de regressão em função das doses de picloram, em deriva simulada. Plantas de *P. dubium* expostas as subdoses de picloram apresentaram valores inferiores de EUA,  $\Phi$  PSII, ETR, clorofila a, em relação as plantas não tratadas com o herbicida, exceto para a clorofila b, que apresentou valor maior quando expostas à deriva (Tabela 1).

**Tabela 1.** Eficiência do uso da água (EUA), rendimento do fotossistema PSII ( $\Phi$  PSII), Taxa de transporte de elétrons (ETR), clorofila a e clorofila b, em plantas de *Peltophorum dubium* expostas as subdoses de picloram.

	EUA $\mu\text{mol CO}_2/$ $\text{mol H}_2\text{O}$	$\Phi$ PSII	ETR $\mu\text{mol m}^2 \text{s}^{-1}$	Colorofila a	Clorofila b
Sem herbicida	$3,12 \pm 0,10$	$0,60 \pm 0,02$	$17,11 \pm 1,28$	$28,19 \pm 0,53$	$4,86 \pm 0,42$
Deriva de Picloram*	$2,63 \pm 0,08$	$0,39 \pm 0,02$	$12,23 \pm 1,62$	$25,86 \pm 1,62$	$7,85 \pm 0,43$

\*Valores médios mais ou menos erro padrão de plantas expostas as cinco subdoses de picloram testadas.

A deriva de picloram ocasionou decréscimo no acúmulo de açúcares solúveis totais e de amido em *P. dubium*. A partir da dose de  $19,2 \text{ g e. a. ha}^{-1}$  do herbicida as plantas apresentaram redução em torno de 14,65 e 18,59% de açúcares solúveis na parte aérea e nas raízes, respectivamente, em relação a testemunha (Figura 6 A - B). As equações exponenciais ajustadas indicam tendência de estabilização nos valores de açúcares solúveis e amido nas plantas de *P. dubium* expostas a dose superior a  $76,8 \text{ g e. a. ha}^{-1}$  de picloram (Figura 6 A - D).

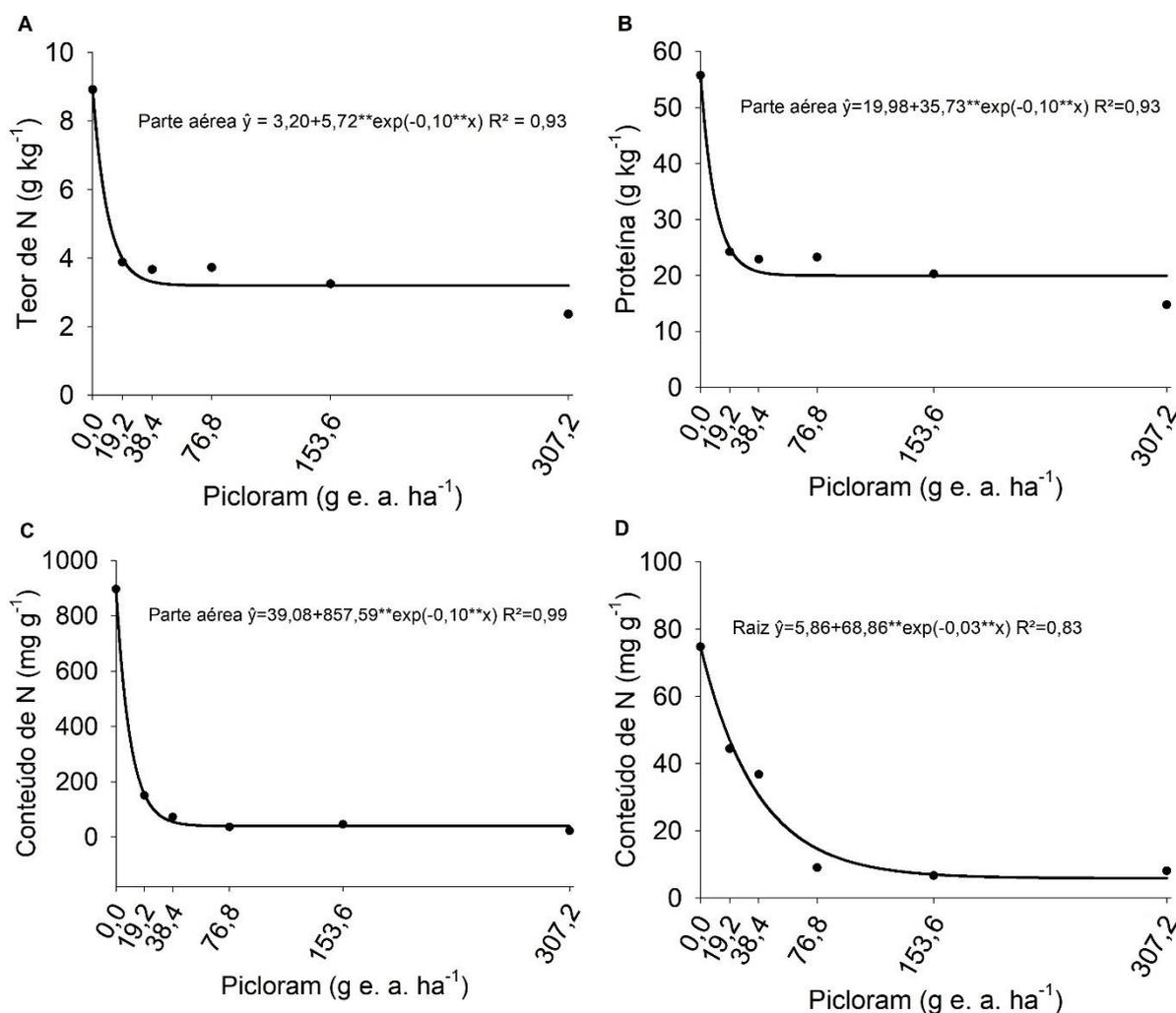


**Figura 6.** Acúmulo de açúcares solúveis na parte aérea (A) e raiz (B) e acúmulo de amido na parte aérea (C) e raiz (D) em plantas de *Peltophorum dubium* sob deriva simulada de picloram. \*\*, \* significativo pelo teste t a ( $p \leq 0,01$ ) e ( $p \leq 0,05$ ), respectivamente.

### Teor e Conteúdo de Nitrogênio e teor de Proteína de *Peltophorum dubium* sob deriva de picloram

Analisando o teor de nitrogênio e a concentração de proteína presente na parte aérea de plantas de *P. dubium*, observou-se comportamento semelhante, com redução acentuada para ambas as variáveis a partir da dose de 19,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram, em relação a testemunha, apresentando mínimos decréscimos em plantas expostas a doses superiores do herbicida (Figura 7 A - B). O conteúdo de nitrogênio na parte aérea e raiz das plantas submetidas ao picloram, também apresentaram comportamento semelhante, com tendência de queda nas plantas expostas até a dose

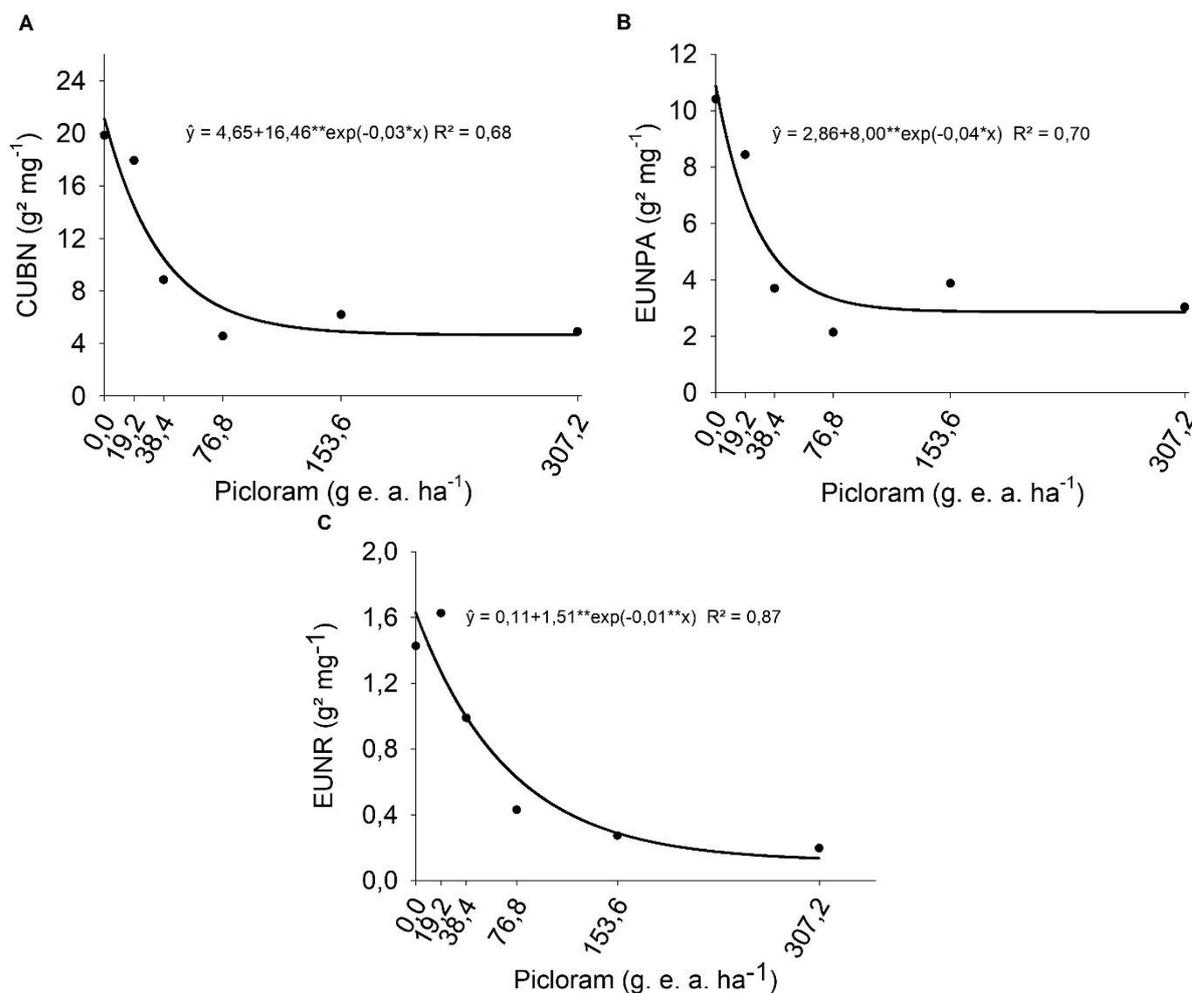
76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>, com mínimos decréscimos para as demais doses (Figura 7 C - D).



**Figura 7.** Teor de nitrogênio (A), Proteína (B), Conteúdo de nitrogênio na parte aérea (C) e raiz (D) em plantas de *Peltophorum dubium* submetidas à deriva simulada de picloram. \*\* significativo pelo teste T ( $p \leq 0,01$ ).

### **Coeficiente de utilização biológica, Eficiência de utilização do nitrogênio na parte aérea e raiz de *Peltophorum dubium* sob deriva de picloram**

A deriva de picloram causou redução no coeficiente de utilização biológica do nitrogênio (CUBN) e na eficiência de utilização do nitrogênio na parte aérea (EUNPA) de *P. dubium* com tendência de queda até a dose 153,6 e 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> do herbicida, respectivamente. A eficiência de utilização do nitrogênio na raiz (EUNR) nas plantas submetidas à dose 19,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> foi 16,6% menor que a testemunha, apresentando tendência de queda a partir dessa mesma dose, com redução na eficiência de utilização até a dose 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de picloram (Figura 8 A - C).



**Figura 8.** Coeficiente de utilização biológica do nitrogênio (CUBN) (A), Eficiência de utilização na parte aérea (EUNPA) (B) e Eficiência de utilização na raiz (EUNR) (C) do nitrogênio em plantas de *Peltophorum dubium* submetidas à deriva simulada de picloram. \*\*, \* significativo pelo teste T a ( $p \leq 0,01$ ) e ( $p \leq 0,05$ ), respectivamente.

## DISCUSSÃO

O picloram, herbicida mimetizador de auxinas naturais de plantas, atua interferindo na ação da enzima RNA-polimerase e conseqüentemente na síntese dos ácidos nucleicos e proteínas (Santos & Masini 2007), provoca intensa proliferação celular em tecidos, acarretando em epinastia de folhas e caule, além de interrupção do floema, impedindo o movimento dos fotoassimilados das folhas para o sistema radicular, levando a planta à morte (Mwakalesi & Potter 2020). No presente estudo, os sintomas observados (Figura 2) são comumente verificados em plantas intoxicadas por herbicidas auxínicos (Fiore et al. 2016). Ressalta-se que a epinastia foliar, inchaço

dos tecidos e início do enrolamento do caule são os primeiros sintomas observados em plantas intoxicadas por herbicidas auxínicos, causado pela ativação de processos metabólicos, como a estimulação da biossíntese de etileno no tecido da parte aérea em resposta ao aumento de auxinas nas plantas (Grossmann 2010; Sobiech et al. 2020).

O rápido aparecimento dos sintomas aos 7 DAA em decorrência de alterações no metabolismo e estruturas, causadas pela ação do picloram, mesmo em doses muito baixas do produto, indica a sensibilidade de *P. dubium* ao herbicida. Diante disso, *P. dubium* é uma espécie promissora no biomonitoramento dos efeitos do picloram na vegetação natural, confirmando dessa forma, a hipótese inicial desse estudo.

As plantas de *P. dubium* apresentaram intoxicação por picloram já nas primeiras doses e ao longo tempo a intoxicação foi intensificada, de forma que a partir da dose de 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> aos 45 dias após aplicação (DAA) 100% das plantas de *P. dubium* foram consideradas mortas (Figura 3A). Além disso, a massa seca das plantas reforça o potencial de intoxicação do picloram, sendo observado a partir da dose de 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> acúmulo de massa seca menor que 20 g tanto para parte aérea quanto para raiz (Figura 3B). Esse resultado revela que as plantas tiveram o crescimento paralisado logo no primeiro contato do herbicida.

A redução da massa seca de *P. dubium* na parte aérea pode estar relacionada ao aumento da concentração do herbicida que impacta na atividade das auxinas no tecido foliar, inibindo o crescimento, além de acelerar o processo de senescência com queda das folhas e conseqüente redução no acúmulo de massa seca da parte aérea (Peterson et al. 2016). O aumento da concentração de auxina na planta estimula a produção de etileno causando anomalias de crescimento e senescência, provocando

a abscisão foliar (Grossmann 2010).

A menor massa seca das raízes de *P. dubium* quando expostas ao herbicida é causada possivelmente pela redução da função metabólica devido à inibição da enzima ATPases e obstrução dos feixes vasculares, causando paralisia do crescimento radicular das mudas (Grossmann 2010). O picloram é uma auxina sintética que atua como regulador de crescimento, semelhante aos hormônios naturais produzidos pelas plantas (Enders & Strader 2015). Esses compostos aumentam a síntese de enzimas celulasas, principalmente carboximetilcelulase (Grossmann 2010) e induzem a destruição do sistema radicular (Peres-Oliveira et al. 2017), o que afeta o acúmulo de massa seca radicular, como observado no presente estudo. Os danos ao sistema radicular e a paralização do crescimento afeta diretamente a obtenção de água e nutrientes pela planta, comprometendo o crescimento e a sobrevivência das mudas de *P. dubium*.

O crescimento e o acúmulo de massa seca, foram afetados negativamente pela redução das trocas gasosas, tendo em vista que a condutância estomática ( $g_s$ ), taxa de transpiração ( $E$ ) e taxa fotossintética ( $A$ ), reduziram após a aplicação de picloram. Sendo essa redução percebida aos 3 DAA logo na menor dose, com tendência de queda até a dose de 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>, a partir da qual apresentou mínimos decréscimos. A redução da fotossíntese pode ser atribuída inicialmente à limitação estomática, evidenciada pela diminuição dos valores de  $g_s$  e  $E$ . A fotossíntese e o crescimento vegetativo estão interligados, de forma que quando a fotossíntese é inibida sob condições adversas, como em situações de intoxicação por herbicidas, o crescimento vegetativo é reduzido ou nulo. Os estômatos são responsáveis pelas trocas gasosas entre as folhas das plantas e o ambiente externo, de forma que a condutância estomática afeta a fotossíntese, a respiração e a transpiração (Cui et al.

2020).

Herbicidas mimetizadores de auxinas como o picloram, por meio de alterações no processo metabólico, provocam produção excessiva e acúmulo prolongado de ácido abscísico (ABA) e etileno, hormônios de maturação das plantas que reduzem a taxa fotossintética (A) (Sobiech et al. 2020). A produção descontrolada desses hormônios resulta em inibição da fotossíntese, envelhecimento e morte acelerada dos tecidos vegetais (Gaines 2020). Apesar de não ter sido avaliado acúmulo de (ABA) e etileno, foi possível observar redução na taxa fotossintética, bem como a morte das plantas expostas a doses superiores a 76,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> e senescência foliar, essa última comumente relatado como ação do excesso de etileno em plantas (Barroso et al. 2022; Ferreira et al. 2019; Grossmann 2010).

Os herbicidas mimetizadores de auxinas em contato com plantas sensíveis levam a formação de enzimas celulasas que atuam na parede celular reduzindo a resistência física desta, permitindo uma maior pressão interna na célula pela água, causando a alongação celular (Mercier 2004; Machado et al. 2006). O aumento da célula pode causar a interrupção dos canais dos feixes vasculares reduzindo a translocação de água (Belo et al. 2011), com consequente impacto na condutância estomática, reduzindo a taxa fotossintética.

Por outro lado, os herbicidas auxínicos atuam no fechamento estomático através da menor absorção de água pelo sistema radicular (Machado et al. 2006), levando a planta a reduzir a perda de água com o fechamento estomático. Os efeitos decorrentes da deriva de herbicidas auxínicos não apenas provocam o fechamento dos estômatos, mas também causa obstrução estomática, devido ao crescimento desordenado da planta e a redução da taxa de *E* (Bondada 2011).

Plantas de *P. dubium* expostas as subdoses de picloram também apresentaram

valor médio inferior para EUA,  $\Phi$  PSII, ETR, Clorofila a, em relação as plantas não tratadas com o herbicida, exceto para a Clorofila b, cujo valor médio maior é verificado quando expostas à deriva de picloram. A eficiência no uso da água é influenciada pela disponibilidade de luz, água, nutrientes, bem como pelas condições morfofisiológicas da planta (Bezerra et al. 2018; Santos et al. 2017). Sendo o fechamento estomático o responsável por influenciar diretamente a eficiência do uso da água, onde, valores maiores são encontrados enquanto os estômatos estão abertos (Araldi et al. 2012). Dessa forma, como a intoxicação por picloram causou forte redução na condutância estomática, as plantas reduziram a EUA, com conseqüente redução na quantidade de água transpirada, bem como na produção de matéria seca (Cruz et al. 2017; Santos et al. 2017; Machado et al. 2010).

Já o rendimento quântico efetivo do fotossistema II indica a fração de energia absorvida pela clorofila associada ao fotossistema II que foi utilizada em atividade fotoquímica, portanto, informa a quantidade de elétrons transportados, sendo um indicativo da fotossíntese (Lichtenthaler et al. 2005). O fator que determina esse rendimento está relacionado com a habilidade com que os elétrons são removidos da quinona receptora do fotossistema II, que por sua vez está relacionado diretamente com a taxa de consumo de ATP e NADPH (Baker & Rosenqvist 2004; Netto et al. 2005). Com o metabolismo prejudicado a planta acaba dissipando a energia não utilizada em forma de calor ou fluorescência e com isso a taxa de transporte de elétrons é reduzida (Silveira et al. 2017). Dessa forma, o rendimento do fotossistema II apresenta redução em função da desregulação fisiológica, uma vez que a taxa de transporte de elétrons cai, assim como a taxa fotossintética e os demais parâmetros fisiológicos.

As quantificações de trocas gasosas possibilitam diagnosticar a integridade do

aparato fotossintético e produtivo da planta em relação a diversos fatores bióticos e abióticos (Zobiolo et al. 2010). Dessa forma, as reduções observadas no rendimento quântico do PSII e na ETR confirmam a ocorrência de fotoinibição (Murata et al. 2007) causada pelo picloram em *P. dubium*.

As clorofilas desempenham importante papel na absorção e transdução de energia e na separação de cargas em centros de reação (Ueda et al. 2014). No presente estudo foi percebido redução no teor de clorofila a, enquanto na clorofila b houve aumento para aquelas plantas expostas ao herbicida. Estudo realizado por Brochado et al. (2022) avaliando efeito dos herbicidas dicamba e 2,4-D em mudas de *Citrus reticulata* Blanco identificaram degradação da clorofila a partir dos 7 DAA. Como o presente trabalho avaliou o teor de clorofila apenas aos 3 DAA, pode não ter sido suficiente para identificar degradação no teor de clorofila b.

A concentração de açúcares solúveis e amido nas plantas expostas ao picloram foram reduzidas de acordo com o aumento das doses, sendo essa redução percebida até a dose de 153,6 g e. a. ha<sup>-1</sup> a partir da qual a concentração de açúcares e amido apresentou mínimos decréscimos. A baixa concentração de açúcares solúveis e amido afeta a capacidade de recuperação das plantas após o estresse sofrido pela intoxicação com picloram, de forma que a baixa reserva de energia reduziu a capacidade da planta em metabolizar o herbicida. O amido atua como reserva de açúcar, e a conversão amido-açúcar nas plantas tem a função de fornecer energia ao metabolismo, desempenhando papel importante na resposta das plantas a vários estresses abióticos (Wang et al. 2023).

A intoxicação por picloram em plantas de *P. dubium*, além de causar impactos no teor de nitrogênio, bem como na concentração de proteínas e no conteúdo de nitrogênio, causou reflexos no coeficiente de utilização biológica do nitrogênio e na

eficiência de utilização do nitrogênio na parte aérea e raiz, visto que esses são calculados a partir da concentração de nitrogênio nas plantas.

O nitrogênio (N) é um macronutriente fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas, responsável por exercer importantes funções em processos bioquímicos e por constituir moléculas de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos, fitocromos e clorofilas (Fleck et al. 2001; Ramírez & Davenport 2010).

O nitrogênio contribui com 1,5 a 5% para a massa seca das plantas superiores (Salim & Raza 2020) e é considerado o nutriente mais crítico entre todos os nutrientes utilizados pelas plantas (Barker & Bryson 2016), pois desempenha importante papel no sistema metabólico (Ahanger & Agarwal 2017). Dessa forma, a redução do nitrogênio provocada pelo picloram nas plantas expostas ao herbicida, afetou diretamente o pleno desenvolvimento e a sobrevivência dessas plantas. Tendo em vista que o picloram é um herbicida de ação hormonal e sistêmica em plantas, que mata ou afeta o crescimento destas interferindo no metabolismo do nitrogênio (Cerdeira et al. 2002).

O coeficiente de utilização biológica do nitrogênio da planta (CUBN) avalia sua eficiência na conversão do nutriente absorvido em matéria seca (Rosim et al. 2016), dessa forma, uma espécie é considerada eficiente do ponto de vista nutricional quando é capaz de sintetizar o máximo de massa seca por nutriente absorvido (Caldeira et al. 2002). De acordo com os resultados do (CUBN), a maior produção de massa seca foi observada na testemunha sem a aplicação do produto. Por outro lado, o CUBN apresentou decréscimo à medida que as subdoses de picloram aumentavam. Isso se justifica, pois os processos que interferem no CUBN estão relacionados com as características morfológicas, como o sistema radicular eficiente, alta relação raiz-parte

aérea e sistema radicular extensivo, incluindo características fisiológicas, como taxa fotossintética e a capacidade de manter o metabolismo normal com baixo teor de nutrientes nos tecidos (Novais et al. 2007). No presente estudo, as plantas expostas ao herbicida apresentavam baixo volume radicular, bem como reduzida taxa fotossintética, condutância estomática e transpiração, evidenciando o metabolismo prejudicado pela deriva do picloram.

*P. dubium* apresenta alta sensibilidade ao picloram, com reflexos em suas características fisiológicas, de crescimento e na sobrevivência das mudas, mesmo em contato com doses baixas do herbicida. Portanto, a aplicação em horários de baixa velocidade do vento e utilização de pontas de pulverização que produzem gotas grossas a extremamente grossas, são boas práticas para aplicação desse herbicida e que devem ser levadas em consideração, evitando assim deriva para áreas adjacentes as áreas tratadas e o contato indesejado com espécies sensíveis não-alvo, como a *P. dubium*.

## CONCLUSÕES

Por apresentar sintomas visuais característicos de intoxicação por picloram, *P. dubium* tem notável potencial como bioindicador sensível aos efeitos deste herbicida no meio ambiente.

A exposição de plantas de *P. dubium* ao picloram apresenta ainda alterações nos parâmetros fisiológicos, o que impacta no crescimento inicial das plantas e sua sobrevivência. Das variáveis fisiológicas analisadas, as não destrutivas como a *A*, *gs*, e *E* podem ser utilizadas como biomarcadores da ação do picloram juntamente com os sintomas visíveis. O diagnóstico nutricional do N, pela avaliação do conteúdo do nutriente, também pode ser feito com a coleta de poucas folhas das plantas e ser usado como biomarcador.

A deriva de picloram possui alto potencial de danos em *P. dubium*. Tal constatação foi possível através do conjunto de respostas apresentadas pela planta, distúrbios fisiológicos, bioquímicos e paralisação do crescimento após a ocorrência da deriva.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado (COD 001) ao primeiro autor. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento de parte dos estudos.

## REFERÊNCIAS

Adarme MO, Feitosa RQ, Happ PN, Almeida CA, Gomes AR (2020) Evaluation of Deep Learning Techniques for Deforestation Detection in the Brazilian Amazon and Cerrado Biomes from Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing* 12(6):910. <https://doi.org/10.3390/rs12060910>

Agrofit-Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários (2024) Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil. [https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofitcons/principal\\_agrofit\\_cons](https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofitcons/principal_agrofit_cons)

Ahanger MA, Agarwal RM (2017) Salinity stress induced alterations in antioxidant metabolism and nitrogen assimilation in wheat (*Triticum Aestivum* L) as influenced by potassium supplementation. *Plant Physiology and Biochemistry* 115:449–60. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2017.04.017>

Araldi R, Girotto M, Velini ED, Gomes GLGC, Jasper SP, Carbonari CA, Trindade MLB (2012) Eficiência fotossintética e consumo de água de *Ipomoea Triloba* após aplicação de herbicidas. *Planta Daninha* 30(3):517–24. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582012000300007>

Bataglia OC, Furlani AMC, Teixeira JPF, Furlani, PR, Gallo JR (1983) Métodos de análise química de plantas. Campinas, Instituto Agrônômico, (Boletim Técnico, 78), 48 p.

Baker NR, Rosenqvist E (2004) Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *Journal of*

- Experimental Botany 55(403):1607–21. <https://doi.org/10.1093/jxb/erh196>
- Barker AV, Bryson GM (2016) Nitrogen. In: Handbook of plant nutrition, (eds.) Allen V. Barker and David J. Pilbeam, 37–66. Boca Raton: CRC Press.
- Barroso GM, Ferreira MG, Santos EA, Ferreira EA, Titon M, Xavier PVS, Francino DMT, Santos JB (2022). *Mabea fistulifera* and *Zeyheria tuberculosa* can be indicated for phytoremediation programs of soils contaminated with hormonal herbicides 24(9):987-994. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1991267>
- Bezerra IL, Nobre RG, Gheyi HR, Lima GS, Barbosa JL (2018) Physiological indices and growth of ‘Paluma’ Guava under saline water irrigation and nitrogen fertigation. Revista Caatinga 31(4):808–16. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n402rc>
- Belo AF, Coelho ATP, Tironi SP, Ferreira EA, Ferreira LR, Silva AA (2011) Atividade fotossintética de plantas cultivadas em solo contaminado com picloram. Planta Daninha 29(4):885–92. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000400019>
- Bondada BR (2011) Micromorpho-anatomical examination of 2,4-d phytotoxicity in Grapevine (*Vitis Vinifera* L.) leaves. Journal of Plant Growth Regulation 30(2):185–98. <https://doi.org/10.1007/s00344-010-9183-7>
- Borges MPS, Silva DV, Souza MF, Silva TS, Teófilo TMS, Silva CC, Pavão QS, Passos ABRJ, Santos JB (2021) Glyphosate effects on tree species natives from Cerrado and Caatinga brazilian biome: Assessing sensitivity to two ways of contamination. Science of The Total Environment 769:144113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144113>
- Brochado MGS, Mielke KC, Paula DF, Laube AFS, Alcántara-de La Cruz R, Gonzatto MP, Mendes KF (2022) Impacts of dicamba and 2,4-D drift on ‘Ponkan’ mandarin seedlings, soil microbiota and *Amaranthus retroflexus*. Journal of Hazardous Materials Advances 6:100084. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100084>
- Caldeira MVW, Rondon Neto RM, Schumacher MV (2002) Avaliação da eficiência nutricional de três procedências australianas de Acácia-Negra (*Acacia Mearnsii* de Wild.). Revista Árvore 26(5):615–20. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000500012>
- Cerdeira AL, Pessoa MCPY, Bonato PS, Queiroz RHC, Lanchote VL (2002) Resíduos e lixiviação do herbicida picloram em água, em área de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Herbicidas 3(1):75. <https://doi.org/10.7824/rbh.v3i1.376>
- Climate-Data. org, (2023) Dados climáticos para cidades mundiais. <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/montes-claros-2886/014..07416>.
- Camilo-Cotrim CF, Bailão EFLC, Ondei LS, Carneiro FM, Almeida LM (2022) What can the *Allium Cepa* test say about pesticide safety? A review. Environmental Science and Pollution Research 29(32):48088–104. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20695-z>

Cruz JL, Coelho Filho MA, Coelho EF, Santos AA (2017) Salinity Reduces Carbon Assimilation and the Harvest Index of Cassava Plants (*Manihot esculenta* Crantz). *Acta Scientiarum. Agronomy* 39(4):545. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i4.32952>

Cui C, Xie X, Wang L, Wang R, Lei W, Lv J, Chen L, Gao H, Ye S, Huang L, Zhou Q (2020) Photosynthetic Index and Nitrogen Assimilation in Rapeseed Seedlings Transplanted in Soil with Ammonium Glufosinate. *Ciência Rural* 50(4):e20180911. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20180911>

Embrapa- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2020) Gestão Integrada da Paisagem no Bioma Cerrado. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/77150778/terraclass-mostra-a-cobertura-e-o-uso-da-terra-no-bioma-cerrado>

Embrapa- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) Sistema brasileiro de classificação de solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, v. 3.

Enders TA, Strader LC (2015) Auxin Activity: Past, Present, and Future. *American Journal of Botany* 102(2):180–96. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400285>

Fales FW (1951) The Assimilation and Degradation of Carbohydrates by Yeast Cells. *Journal of Biological Chemistry* 193(1):113–24. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52433-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52433-4)

Ferreira MG, Barroso GM, Costa VAM, Castro BMC, Zanuncio JC, Pereira IM, Ferreira EA, Francino DMT, Santos, JB (2019) Development of native forest species of the Atlantic forest in soil contaminated with hormonal herbicides. *International Journal of Phytoremediation* 21(9):921-927. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1583636>

Fiore RA, Santos JB, Ferreira EA, Cabral CM, Pereira IM (2016) Growth and Nutritional Analysis of Tree Species in Contaminated Substrate by Leachable Herbicides. *Revista Árvore* 40(4):585–94. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000400002>

Fleck NG, Rizzardi MA, Neves R, Agostinetto D (2001) Ação Dos Herbicidas Atrazine e Glufosinate de Amônio No Aproveitamento de Nitrogênio Pelas Plantas de Milho.” *Planta Daninha* 19(2):235–45. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582001000200012>

Frans RE, Talbert R, Marx D, Crowley H (1986) Experimental design techniques for measuring and analyzing plant responses to weed control practices. In: Camper N.D., editor. *Research methods in weed science*. 3rd. ed. Champaign: Weed Science Society. p.29-46.

Freitas-Silva L, Araújo TO, Nunes-Nesi A, Ribeiro C, Costa AC, Silva LC (2020) Evaluation of Morphological and Metabolic Responses to Glyphosate Exposure in Two Neotropical Plant Species. *Ecological Indicators* 113:106246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106246>

Gaines TA (2020) The quick and the dead: a new model for the essential role of ABA accumulation in synthetic auxin herbicide mode of action. *Journal of Experimental Botany* 71(12):3383–85. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa178>

Grossmann K (2010) Auxin herbicides: current status of mechanism and mode of action. *Pest Management Science* 66(2):113–20. <https://doi.org/10.1002/ps.1860>

Lichtenthaler HK, Buschmann, Knapp M (2005) How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio  $R_{Fd}$  of Leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica* 43(3):379–93. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>

Machado AFL, Ferreira LR, Santos LDT, Ferreira FA, Viana RG, Machado MS, Freitas FCL (2010) Eficiência fotossintética e uso da água em plantas de Eucalipto pulverizadas com glyphosate. *Planta Daninha* 28(2):319–27. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000200011>

Machado RF, Barros ACSA, Zimmer PD, Amaral AS (2006) Reflexos do mecanismo de ação de herbicidas na qualidade fisiológica de sementes e na atividade enzimática em plântulas de arroz. *Revista Brasileira de Sementes* 28(3):151–160. <https://doi.org/10.15990/S0101-31222006000300022>

McCready RM, Guggolz J, Silviera V, Owens HS (1950) Determination of starch and amylose in vegetables. *Analytical Chemistry* 22(9):1156–58. <https://doi.org/10.1021/a-c60045a016>

MapBiomas (2023) Project. Collection 8 of the Annual Land Cover and Land Use Maps of Brazil (1985-2022), MapBiomas Data, V1. <https://doi.org/10.58053/MapBiomas/VJIJCL>

Mercier H. Auxinas. In: Kerbauy GB (Ed) (2004) *Fisiologia Vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogans S.A. p.217-249.

Monquero PA, Bevilaqua NC, Silva PV, Hirata ACS, Nocelli RCF (2016) Initial growth of tree species under herbicide drift. *Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences* 59(2):162–72. <https://doi.org/10.4322/rca.2197>

Murata N, Takahashi S, Nishiyama Y, Allakhverdiev SI (2007) Photoinhibition of photosystem ii under environmental stress. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics* 1767(6):414–21. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2006.11.019>

Mwakalesi AJ, Potter ID (2020) Removal of picloram herbicide from an aqueous environment using polymer inclusion membranes. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 8(5):103936. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.103936>

Netto AT, Campostrini E, Oliveira JG, Bressan-Smith R (2005) Photosynthetic pigments, nitrogen, chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves. *Scientia Horticulturae* 104(2):199–209. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013>

Novais RF, Alvarez, VH, Barros, NF, Fontes, RLF, Cantarutti, RB, Neves, JCL (2007). *Fertilidade do solo* (1. ed.). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Passos ABRJ, Souza MF, Saraiva DT, Silva AA, Queiroz MELR, Carvalho FP, Silva DV (2019) Effects of liming and *Urochloa Brizantha* management on leaching potential of picloram. *Water, Air, & Soil Pollution* 230(1):12. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4062-0>

Peres-Oliveira MA, Bonfim-Silva EM, Silva VM, Silva TJA, Sousa HHF (2017) Soybean as bioindicador of residual effect of 2,4-d herbicide in an oxisol from the Brazilian Cerrado. *African Journal of Agricultural Research* 12(1):35–41. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11863>

Peterson MA, McMaster SA, Riechers DE, Skelton J, Stahlman PW (2016) 2,4-d past, present, and future: A review. *Weed Technology* 30(2):303–45. <https://doi.org/10.1614/WT-D-15-00131.1>

Ramírez F, Davenport TL (2010) Mango (*Mangifera Indica* L.) Flowering Physiology. *Scientia Horticulturae* 126 (2):65–72. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.06.024>

Ratola N, Homem V, Silva JA, Araújo R, Amigo JM, Santos L, Alves A (2014) Biomonitoring of pesticides by pine needles - chemical scoring, risk of exposure, levels and trends. *Science of The Total Environment* 476–477:114–24. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.003>

Rezende-Silva SL, Costa AC, Dyszy FH, Batista PF, Crispim-Filho AJ, Nascimento KJT, Silva AA (2019) *Pouteria Torta* is a remarkable native plant for biomonitoring the glyphosate effects on Cerrado vegetation. *Ecological Indicators* 102:497–506. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.003>

Rodrigues DA, Sales JF, Vasconcelos-Filho SC, Rodrigues AA, Costa AC, Rodrigues CL, Silva FHL, Müller C (2020) *Spondias mombin*, a potential bioindicator of potassium fluoride pollution. *Ecological Indicators* 114:106314. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106314>

R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.

Rosim CC, Hsing TY, Paula RC (2016) Nutrient use efficiency in interspecific hybrids of eucalypt. *Revista Ciência Agronômica* 47(3):540–47. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160065>

Salim N, Raza A (2020) Nutrient use efficiency (NUE) for sustainable wheat production: a review. *Journal of Plant Nutrition* 43(2):297–315. <https://doi.org/10.1080/01904167.2019.1676907>

Santos MV, Ferreira EA, Valadão D, Oliveira FLR, Machado VD, Silveira RR, Souza MF (2017) *Brachiaria* physiological parameters in agroforestry systems. *Ciência Rural* 47(5): e20160150. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20160150>

Santos LBO, Masini JC (2007) Determination of picloram in natural waters employing sequential injection square wave voltammetry using the hanging mercury drop electrode. *Talanta* 72(3):1023-29. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.12.030>

Seiler LK, Decoteau DR, Davis DD (2014) Evaluation of *Ailanthus altissima* as a bioindicator to detect phytotoxic levels of ozone. *Northeastern Naturalist* 21(4):541-53. <https://doi.org/10.1656/045.021.0405>

Siddiqi MY, Glass ADM (1981) Utilization Index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. *Journal of Plant Nutrition* 4(3):289-302. <https://doi.org/10.1080/01904168109362919>

Silva FB, Costa AC, Müller C, Almeida GM, Nascimento KJT, Batista PF, Vital RG, Silva DG, Megguer CA, Jakelaitis A, Domingos M (2022) Searching for biomarkers of early detection of 2,4-d effects in a native tree species from the Brazilian Cerrado biome. *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 57(1):71–80. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2028528>

Silva TS, Rando JG, Carvalho DAS (2023) *Peltophorum* in Flora e Funga do Brasil. *Jardim Botânico do Rio de Janeiro*. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB83567>

Silveira RR, Santos MV, Ferreira EA, Santos JB, Silva LD (2017) Chlorophyll fluorescence in *Brachiaria Decumbens* and *Brachiaria Ruziziensis* submitted to herbicides. *Planta Daninha* 35(0)1-9. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582017350100042>

Sobiech L, Grzanka M, Kurasiak-Popowska D, Radzikowska D (2020) Phytotoxic effect of herbicides on various *Camelina* [*Camelina sativa* (L.) Crantz] genotypes and plant chlorophyll fluorescence. *Agriculture* 10(5):185. <https://doi.org/10.3390/agriculture10050185>

Song Y (2014) Insight into the mode of action of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) as an herbicide. *Journal of Integrative Plant Biology* 56(2):106–13. <https://doi.org/10.1111/jipb.12131>

Ueda M, Tanaka A, Sugimoto K, Shikanai T, Nishimura Y (2014) Chlb requirement for chlorophyll biosynthesis under short photoperiod in *Marchantia polymorpha* L. *Genome Biology and Evolution* 6(3):620-28. <https://doi.org/10.1093/gbe/evu045>

Villegas E, Ortega E, Bauer R (1985) Métodos Químicos Usados En El CIMMYT para determinar la calidad de proteína de los cereales. Ciudad de México: Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. 34p. <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/3796/13389.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Wang J, Yang Q, Han J, He Z, Min Yang, Wang X, Lin X (2023) Effect of nicosulfuron on dynamic changes in the starch-sugar interconversion in sweet maize (*Zea mays* L.). *Environmental Science and Pollution Research* 30(21):59606–20. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26766-z>

Zobiolo LHS, Kremer RJ, Oliveira RS, Constantin J (2010) Glyphosate affects

photosynthesis in first and second generation of glyphosate-resistant soybeans. *Plant and Soil* 336(1-2):25-65. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0474-3>

**4.2 Artigo 2 - Respostas morfofisiológicas e bioquímicas de *Peltophorum dubium* sob deriva de glyphosate**

Este artigo foi elaborado conforme normas da Revista Ecotoxicology.

## Respostas morfofisiológicas e bioquímicas de *Peltophorum dubium* sob deriva de glyphosate

**Resumo:** O uso intensivo do glyphosate, um dos principais herbicidas usados no Brasil, tem sido questionado quanto a ocorrência de contaminações por deriva em fragmentos florestais adjacentes a áreas agrícolas. Os objetivos foram: i) determinar a sensibilidade de *Peltophorum dubium* e a ação do glyphosate sobre mudas da espécie arbórea via contaminação por deriva; ii) avaliar o potencial bioindicador da espécie no monitoramento de contaminação por esse herbicida no Cerrado. Os tratamentos testados foram a aplicação das subdoses 28,8; 57,6; 115,2; 230,4 e 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate, correspondentes a 2, 4, 8, 16 e 32% da dose comercial recomendada de 1440 g e. a. ha<sup>-1</sup>, em deriva simulada. Foram observados típicos sintomas da ação do glyphosate nos folíolos de *P. dubium* como clorose, necrose, murcha e desenvolvimento desigual, além de brotação descontrolada e amarelecimento no ápice caulinar e redução do crescimento. A intoxicação das mudas de *P. dubium* aos 45 dias após aplicação (DAA) foi muito baixa (<4%) em doses inferiores a 115,2 g e. a. ha<sup>-1</sup> e atingiram 40% de intoxicação na exposição a 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate. Nas plantas expostas a dose de 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> aos 7 (DAA) pode-se observar redução para a taxa fotossintética, transpiração e condutância estomática de 22,66%, 18,06% e 33,33%, respectivamente, em relação a testemunha. Dessa forma, a partir das respostas morfofisiológicas das plantas de *P. dubium* expostas ao glyphosate, percebe-se que a espécie apresenta baixa sensibilidade a doses mais baixas do herbicida, por outro lado, a tolerância apresentada pela espécie revela a capacidade de sobrevivência em áreas sujeitas a deriva de glyphosate e uma possibilidade de uso do produto em seus cultivos, em aplicações dirigidas às plantas daninhas.

**Palavras-chave:** clorose, necrose, folhas, condutância estomática, subdose, parte aérea, raiz, bioindicador.

### Morphophysiological and biochemical responses of *Peltophorum dubium* under glyphosate drift

**Abstract:** The intensive use of glyphosate, one of the main herbicides used in Brazil, has been questioned with regard to the occurrence of drift contamination in forest fragments adjacent to agricultural areas. The objectives were: i) to determine the sensitivity of *Peltophorum dubium* and the action of glyphosate on seedlings of the tree species via contamination by drift; ii) to evaluate the bioindicator potential of the species in monitoring contamination by this herbicide in the Cerrado. The treatments tested were the application of sub-doses of 28.8, 57.6, 115.2, 230.4 and 460.8 g a. e. ha<sup>-1</sup> of glyphosate, corresponding to 2, 4, 8, 16 and 32% of the recommended commercial dose of 1440 g a. e. ha<sup>-1</sup>, in simulated drift. Typical symptoms of the action of glyphosate on *P. dubium* leaflets were observed, such as chlorosis, necrosis, wilting and uneven development, as well as uncontrolled sprouting and yellowing at the stem apex and reduced growth. Intoxication of *P. dubium* seedlings at 45 days after application (DAA) was very low (<4%) at doses lower than 115.2 g a. e. ha<sup>-1</sup> and reached 40% when exposed to 460.8 g a. e. ha<sup>-1</sup> of glyphosate. In the plants exposed to a dose of 460.8 g e. a. ha<sup>-1</sup> at 7 (DAA), there was a reduction in photosynthetic rate, transpiration and stomatal conductance of 22.66%, 18.06% and 33.33%, respectively, compared to the control. Thus, from the morphophysiological responses of *P. dubium* plants exposed to glyphosate, it can be seen that the species shows low sensitivity to

lower doses of the herbicide. On the other hand, the tolerance shown by the species reveals its ability to survive in areas subject to glyphosate drift and the possibility of using the product in its crops, in applications directed at weeds.

**Keywords:** chlorosis, necrosis, leaves, stomatal conductance, underdose, aerial part, root, bioindicator.

## INTRODUÇÃO

A utilização inadequada de herbicidas e em desacordo com as boas práticas agronômicas em cultivos agrícolas e na silvicultura tem causado diversos impactos, entre eles, a contaminação do solo (Wołejko et al. 2022), água (Javaid et al. 2023) e de matas nativas adjacentes (Ferreira et al. 2023; Carpenter et al. 2020). A utilização de herbicidas em áreas agrícolas torna-se necessária na busca de maiores produtividades, sobretudo em grandes áreas de cultivo (Ofosu et al. 2023). Porém, pode ocorrer durante a aplicação problemas com o arraste de partículas pelos ventos para áreas adjacentes, processo denominado de deriva (Cruz et al. 2021).

No Brasil os plantios florestais e pastagens estão localizadas em biomas que cederam grandes áreas para os cultivos agrícolas, sobretudo as commodities agrícolas, sendo fortemente impactados. O Cerrado brasileiro é o bioma com maior área agrícola, respondendo por cerca de 48% da área de soja plantada no Brasil (Mapbiomas 2023), sendo este bioma transformado em uma paisagem de fragmentos de vegetação nativa margeada por grandes áreas de monocultivo, diretamente expostas aos efeitos do uso de herbicidas.

Dentre os herbicidas o glyphosate (N-fosfometil-glicina) é considerado a molécula mais utilizada globalmente (Novotny 2022). Somente no Brasil, no ano de 2022, a comercialização de glyphosate atingiu cerca de 231 toneladas de ingrediente ativo (Ibama 2022). O glyphosate age inibindo a ação da 5-enolpiruvil-shikimato-3-fosfato sintase (EPSPS), enzima responsável por catalisar a transformação do chiquimato-3-fosfato em 5-enolpiruvil-shikimato-3-fosfato (Cruvinel et al. 2019). A

inibição da EPSPS leva à desregulação do fluxo de carbono na planta e a um acúmulo de chiquimato e em uma perda de aminoácidos aromáticos necessários para produção de proteínas essenciais para o crescimento das plantas (Kisvarga et al. 2023).

A aplicação de glyphosate nas áreas agrícolas pode contaminar áreas vizinhas, já que uma porção do herbicida pode se dispersar pela deriva e atingir a vegetação adjacente. O risco de contaminação por deriva é potencializado quando a aplicação é realizada em condições meteorológicas inadequadas, como ventos fortes, favorecendo o arraste de partículas do herbicida que podem atingir espécies não-alvo em fragmentos florestais adjacentes aos cultivos agrícolas (Dupont et al. 2018; Lucadamo et al. 2018).

A literatura aborda o efeito do glyphosate em organismos não-alvo, bem como o uso de plantas bioindicadoras da contaminação por esse herbicida, porém com poucos trabalhos sobre a sensibilidade de espécies florestais do Cerrado (Rezende-Silva et al. 2022; Borges et al. 2021; Oliveira et al. 2021; Batista et al. 2018).

A utilização de plantas no biomonitoramento tem-se destacado como uma alternativa para avaliar o impacto dos herbicidas no meio ambiente (Silva et al. 2022; Cruz et al. 2021; Silva et al. 2020; Batista et al. 2018). As respostas a intoxicação que uma determinada espécie de planta apresenta quando exposta a um herbicida caracteriza-se como biomarcadores, sendo esses determinantes na identificação de uma planta como bioindicador (Lima et al. 2017). Os principais biomarcadores utilizados no biomonitoramento compreendem sintomas visuais, como clorose e necrose, taxa fotossintética, condutância estomática, taxa de transpiração, conteúdo de pigmento fotossintético, acúmulo de ácido chiquímico (Cruz et al. 2021; Freitas-Silva et al. 2020), concentração de compostos fenólicos, proteínas e aminoácidos

(Rezende-Silva et al. 2019) e atividades de catalase e ascorbato peroxidase (Silva et al. 2022).

*Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub é uma espécie arbórea nativa do Cerrado comumente utilizada na recomposição de áreas degradadas e de preservação permanente (Carnevali et al. 2016). Esta espécie apresenta grande potencial de uso no biomonitoramento da ação de herbicidas no Cerrado, pois possui ampla distribuição (Silva et al. 2023), podendo então ser avaliada como espécie bioindicadora (Seiler et al. 2014). Por ter ocorrência frequente em áreas próximas da atividade agrícola torna a espécie vulnerável a problemas com a deriva de herbicidas, com destaque para glyphosate.

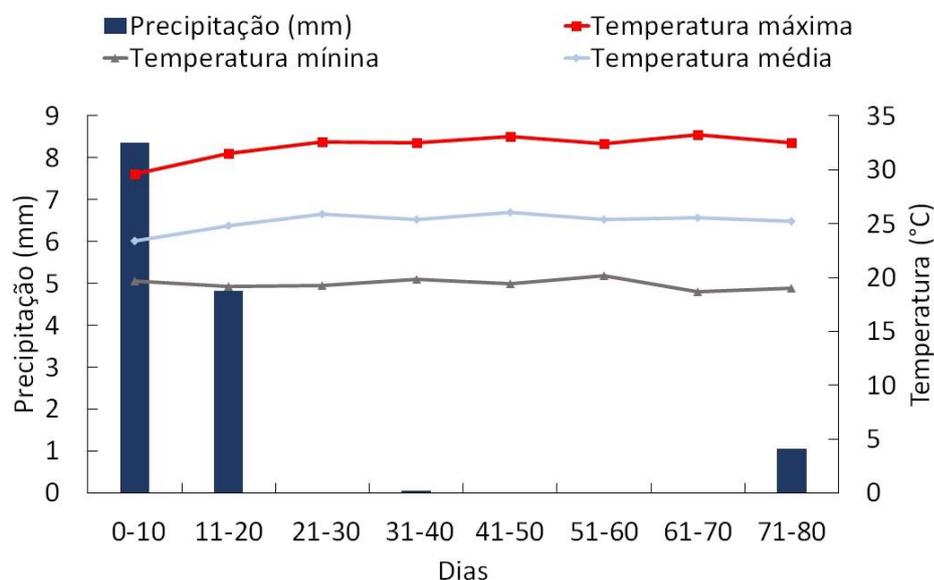
A hipótese do presente estudo é de que *P. dubium* é sensível ao glyphosate, o que pode ocasionar risco para conservação da espécie e sua permanência em áreas fragmentadas do Cerrado brasileiro, bioma considerado o mais ameaçado pela expansão da agricultura no Brasil (Schwaida et al. 2023; Cima et al. 2023; Alencar et al. 2020). Caso a espécie apresente sensibilidade ao glyphosate, esta poderá ser usada para fins de biomonitoramento desse herbicida no ambiente. Sendo assim, este estudo teve como objetivo determinar a sensibilidade de *P. dubium* a deriva de glyphosate, bem como avaliar o potencial bioindicador de *P. dubium* no monitoramento de contaminação por este herbicida no Cerrado brasileiro.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### **Localização do experimento e obtenção das mudas de *Peltophorum dubium***

O experimento foi desenvolvido no Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA-UFMG), campus Montes Claros-MG, localizado na latitude 16°40'57,70" Sul, longitude 43°50'19,62" Oeste. A região possui clima do tipo Aw, de acordo com classificação de Köppen (Climate-Data 2023). As medias decendiais de temperatura e de chuvas durante o período experimental são

apresentados na (Figura 1), e foram obtidos em estação meteorológica localizada a cerca de 675 m da área experimental.



**Figura 1.** Caracterização climática da área experimental, no período de janeiro a abril de 2023 entre o transplante das mudas ao final do experimento, com médias decendiais de precipitação (mm) e temperaturas (°C).

Mudas de propagação seminífera de *P. dubium* foram produzidas em tubetes de 290 cm<sup>3</sup>, contendo substrato comercial BIOPLANT® (33,3% de moinha de carvão, 33,3% de esterco bovino curtido e 33,4% de substrato de fibras vegetais + vermiculita), acrescido de 75 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 15 g de K<sub>2</sub>O por metro cúbico de substrato.

As sementes usadas na produção das mudas são oriundas de árvores matrizes localizadas em área de Cerrado, no Norte de Minas Gerais. Para semeadura procedeu-se a escarificação mecânica das sementes sendo semeadas 3 sementes/tubete, com posterior desbaste mantendo uma planta/tubete. As mudas de *P. dubium* permaneceram em viveiro por 108 dias, sendo irrigadas diariamente e com adubações quinzenais de cobertura com 10 g L<sup>-1</sup> de formulado comercial NPK 04:20:12.

Após a produção das mudas estas foram selecionadas e padronizadas quanto ao vigor e altura, sendo transplantadas para vasos de 12 litros preenchidos com

substrato na proporção de 3:1:1 (solo: areia: esterco bovino). As características físicas e químicas do substrato usado para o cultivo das mudas nos vasos foram: pH em água: 6,5; areia: 57,77 dag kg<sup>-1</sup>; silte: 24,95 dag kg<sup>-1</sup>; argila: 17,27 dag kg<sup>-1</sup>; teor de matéria orgânica: 3,84 dag kg<sup>-1</sup>; P Mehlich-1: 536,2 mg dm<sup>-3</sup>; P remanescente: 47,1 mg L<sup>-1</sup>; K: 363,8 mg dm<sup>-3</sup>; Ca: 7,44 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Mg: 2,02 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; Al: 0,0 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; H + Al: 1,55 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; SB: 10,39 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; t: 10,39 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; m: 0,0 %; T: 11,95 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>; V: 86,99 % e Carbono Org.: 2,23 dag kg<sup>-1</sup>.

Durante o cultivo de *P. dubium* nos vasos foi mantido o solo úmido, com irrigações diárias, conforme necessidade das plantas, mantendo-se a capacidade de campo entre 80 e 100%. As plantas receberam adubação de cobertura a cada quinze dias, com 3 g de ureia (45% de N) e 3 g de cloreto de potássio (60% de K<sub>2</sub>O).

### **Desenho Experimental e aplicação do glyphosate em deriva simulada sob as mudas de *Peltophorum dubium***

No estudo utilizou-se blocos casualizados, com 6 repetições, sendo cada parcela experimental representada por uma planta de *P. dubium*. Para simular a deriva, as plantas foram submetidas a aplicação de 28,8; 57,6; 115,2; 230,4 e 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate (Roundup Original® Mais, 480 g e. a L<sup>-1</sup> de glyphosate, Monsanto, São Paulo, Brasil), e a testemunha (sem aplicação do herbicida). As doses aplicadas referem-se a subdoses, em simulação à deriva do herbicida, e correspondem a 2, 4, 8, 16 e 32% da dose de 1440 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate, frequentemente usada no controle de plantas daninhas na cultura da soja, milho, algodão, eucalipto e na dessecação para o plantio direto e na eliminação da soqueira da cana-de-açúcar (Agrofit 2024).

A aplicação da calda herbicida foi realizada 40 dias após transplântio das mudas de *P. dubium* para os vasos. No momento da aplicação as plantas estavam com

aproximadamente 43 cm de altura e 0,97 mm de diâmetro. Já as condições ambientais apresentavam valores de 20,54°C de temperatura média, 77,2% de umidade relativa do ar e 3,3 Km h<sup>-1</sup> de velocidade do vento no momento da aplicação, que foi realizada entre 7 e 9 h da manhã. Utilizou-se pulverizador costal (modelo PJH, Jacto do Brasil SA, Pompeia, Brasil) ponta de pulverização (modelo TTI11002, Teejet, Wheaton, Illinois, USA) e válvula reguladora de pressão constante a 200 kPa (modelo U7466.00, Guarany, Itu, Brasil), calibrado para aplicação de 116 L ha<sup>-1</sup> de calda.

### **Análise das características fisiológicas de *Peltophorum dubium* sob deriva de glyphosate**

Aos 4 e 7 dias após a aplicação (DAA) foram avaliadas a taxa fotossintética, condutância estomática e a taxa de transpiração com analisador de gás infravermelho - IRGA (Lcpro-SD, Analytical Development Co. Ltd, Hoddesdon, Reino Unido) com fonte de luz acoplada de 1200  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ . A medição de clorofila a e clorofila b foram realizadas com clorofilômetro (modelo CFL1030, Falker, Porto Alegre, Brasil). O rendimento do fotossistema II ( $\Phi$  PSII) e a taxa de transporte de elétrons (ETR) foram realizadas com auxílio do aparelho fluorômetro Y (II) meter (modelo PSK, Opti-Sciences, Hudson, USA). A eficiência instantânea do uso da água (EUA) foi calculada através da razão da fotossíntese pela transpiração. As avaliações fisiológicas foram realizadas em folíolos localizados no terço superior da planta, em folha completamente expandida, no horário entre 8 e 11h da manhã.

### **Análise das características morfológicas e de intoxicação de *Peltophorum dubium* sob deriva de glyphosate**

As plantas foram avaliadas quanto a intoxicação pelo glyphosate aos 15, 30 e 45 (DAA) por meio de escala de notas de 0 a 100%, onde 0% corresponde a ausência de sintomas visíveis e 100% a morte da planta (Frans et al. 1986). As avaliações de

intoxicação foram realizadas por três avaliadores treinados, sendo os valores por parcela determinados pela média aritmética das três observações. Os sintomas de intoxicação por glyphosate em plantas de *P. dubium* foram descritos e fotografados para o devido registro da ação do produto.

A altura (cm) das plantas foi mensurada com régua graduada, considerando a superfície do solo até o ápice caulinar, já o diâmetro do caule (mm) foi obtido com paquímetro, medido a dois centímetros da superfície do caule, aos 0 e 45 (DAA). O incremento em altura (cm) e em diâmetro (mm) das mudas de *P. dubium* foi obtido pela diferença entre os valores obtidos de cada variável aos 45 DAA e imediatamente antes da aplicação do glyphosate.

Aos 45 DAA as plantas de *P. dubium* foram cortadas para determinação da massa seca da parte aérea, raízes e total, sendo o material separado, acomodado em sacos do tipo Kraft e levados para secagem em estufa com circulação de ar a 65°C por 72 horas.

### **Análise da concentração de açúcares e amido de *Peltophorum dubium* sob deriva de glyphosate**

A concentração de açúcares e amido presente na parte aérea e raiz das plantas de *P. dubium* foi determinada seguindo a metodologia adaptada de McCready et al. (1950). As amostras foram moídas com auxílio de moinho de facas (modelo CE-340/MACRO, Cienlab, Campinas, Brasil) sendo, posteriormente, tomada uma fração de 0,2 g da amostra e adicionado 1,5 mL de etanol 80% em ebulição, para remoção de açúcares solúveis, mono, di e trissacarídeos. Posteriormente, o material foi centrifugado a 3000 rpm por 10 min, realizado quatro vezes e os sobrenadantes foram coletados em balão volumétrico de 100 mL e completados com água destilada, onde foram reservados para análise de açúcares solúveis. Em seguida, o precipitado foi

ressuspenso em 1,5 mL de ácido perclórico a 30%, agitado por 2 min em turbilhador e deixado em repouso por 30 min, seguido de centrifugação a 3000 rpm por 10 min, procedimento repetido por três vezes. Os sobrenadantes obtidos foram coletados em balão volumétrico e completados com água destilada, para quantificação dos teores de amido e açúcares pela reação com antrona (Fales 1951) em espectrofotômetro (modelo 1600 UV, Nova Instruments, Piracicaba, Brasil), com leituras em 620 nm.

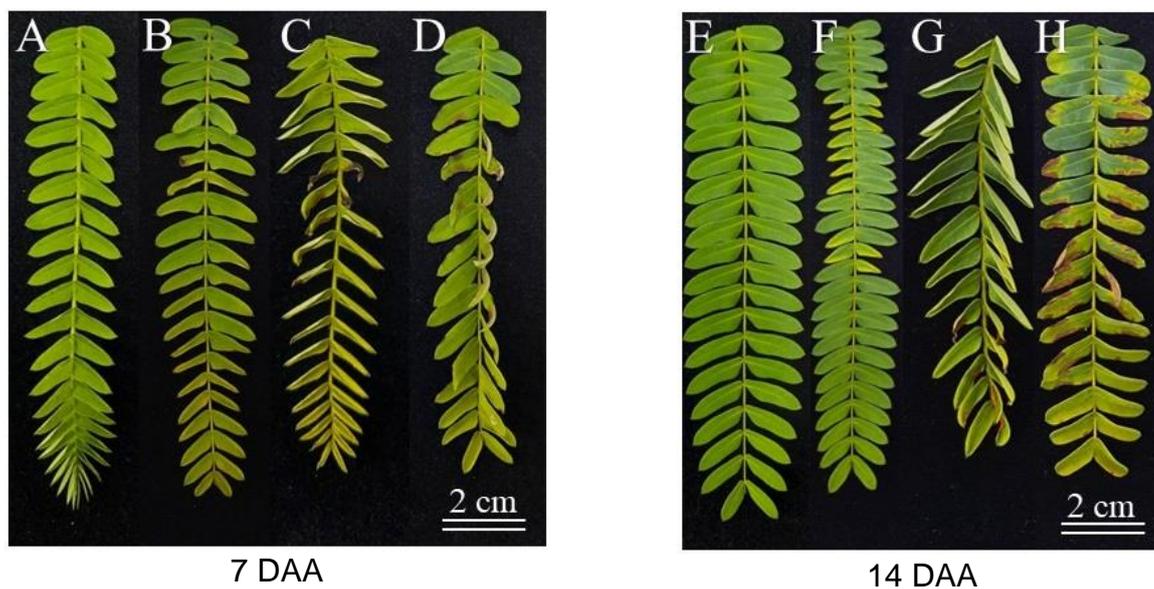
### **Análise de dados**

As variáveis respostas das plantas de *P. dubium* submetidas à deriva do glyphosate relativos as características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e de intoxicação foram primeiramente submetidos à análise de variância, e quando apresentado significância foi ajustado regressão, ambos a 5% de probabilidade. As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software R (R Core Team 2022).

## **RESULTADOS**

### **Sintomas característicos de intoxicação de glyphosate em *Peltophorum dubium***

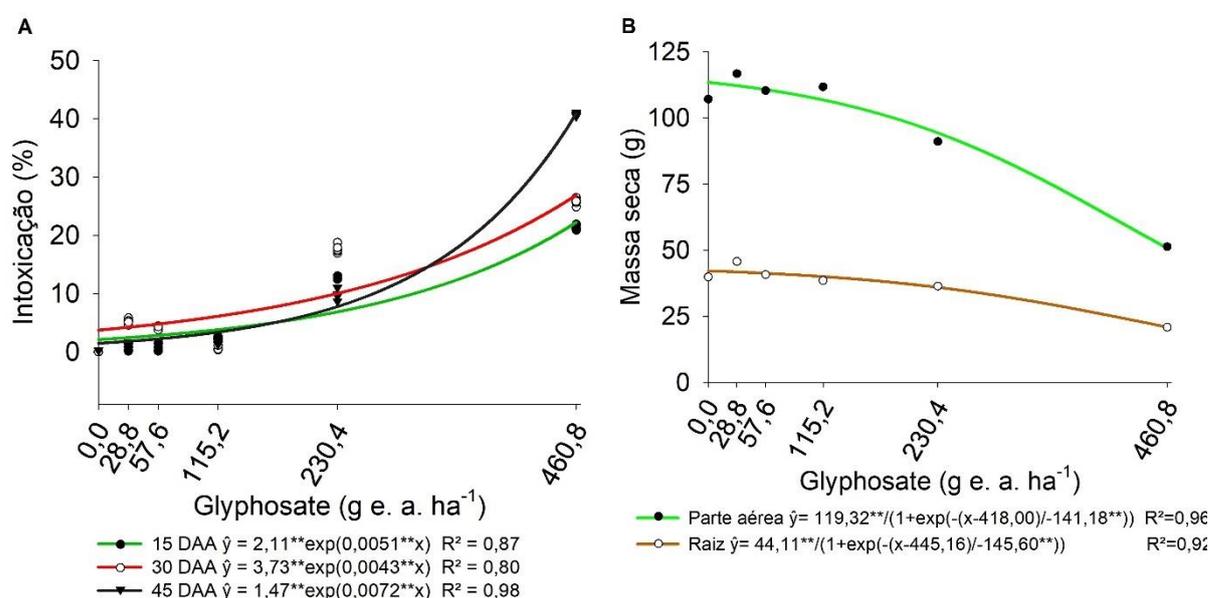
As plantas de *P. dubium* expostas as subdoses de glyphosate, sob deriva simulada, apresentaram sintomas característicos de intoxicação causados pela ação do herbicida glyphosate (Figura 2) principalmente no ápice e nas folhas do terço superior da planta. Os sintomas visuais de intoxicação observados corresponderam a clorose, pontos de necrose, murcha de folhas, enrugamento foliar, desenvolvimento desigual de folíolos (Figura 2 A – H), brotação descontrolada e amarelecimento no ápice caulinar (Figura 2 J - K), além de redução do crescimento em altura e em diâmetro. Os danos decorrentes da intoxicação foram maiores a partir da dose de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, enquanto nas menores doses as plantas apresentavam poucos sintomas de intoxicação, com sinais de recuperação ao longo dos 45 dias de avaliação.



**Figura 2.** Sintomas característicos de intoxicação em plantas *Peltophorum dubium* aos 7 e 14 dias após aplicação de subdoses de glyphosate em deriva simulada, (A) (E) Testemunha, (B) (F) 115,2 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (C) (G) 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (D) (H) 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>. (I) Testemunha, (J) 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> - Círculo em amarelo: superbrotação e clorose no ápice caulinar, Setas em amarelo: clorose e necrose nos folíolos, (K) 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> - Setas em amarelo: pontos de necrose nos folíolos e no ápice caulinar. Aspectos gerais aos 45 dias após aplicação de subdoses de glyphosate (L) Testemunha, (M) 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, (N) 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>.

### Taxa de intoxicação e crescimento de *P. dubium* submetida à deriva de glyphosate

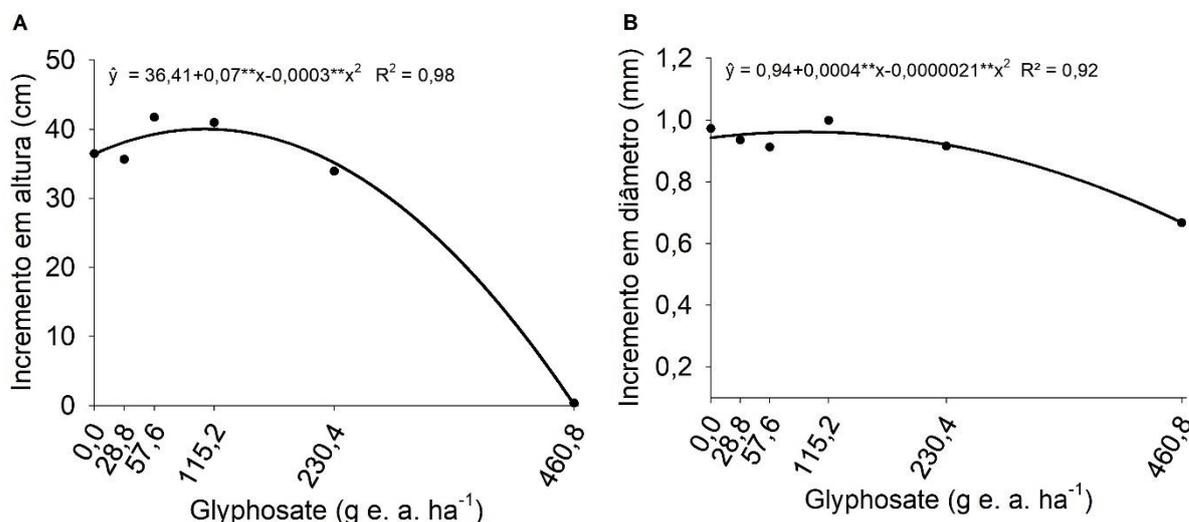
Com relação a intoxicação das plantas de *P. dubium*, pode-se observar intoxicação (<4%) em doses inferiores a 115,2 g e. a. ha<sup>-1</sup>, por outro lado, as plantas expostas a 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> apresentavam 40% de intoxicação provocada pela ação do glyphosate aos 45 (DAA) (Figura 3 A). Essa intoxicação causou reflexos no acúmulo de massa seca da parte aérea e raiz das plantas, sendo essa redução na massa seca inversamente proporcional ao aumento das doses. A massa seca da parte aérea foi a mais impactada, observando redução de 55,29% para as plantas expostas a dose de 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate, em relação à testemunha (Figura 3 B).



**Figura 3.** (A) Taxa de intoxicação aos 15, 30 e 45 dias após aplicação e acúmulo de massa seca da parte aérea e raiz (B) de plantas de *Peltophorum dubium* expostas a subdoses de glyphosate, em deriva simulada. \*\* significativo pelo teste T ( $p \leq 0,01$ ).

O incremento em altura e diâmetro do caule das plantas *P. dubium* foram diretamente influenciados pela intoxicação causada a partir da dose de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate. Em relação à testemunha, as plantas expostas a dose de 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> apresentaram redução de 86,38% no incremento em altura (Figura 4 A). O incremento em diâmetro também foi impactado pela intoxicação causada pelo glyphosate, sendo que o incremento em diâmetro na dose de 460,8 g. e. a. ha<sup>-1</sup> foi

28,72% menor em relação ao observado na testemunha (Figura 4 B).

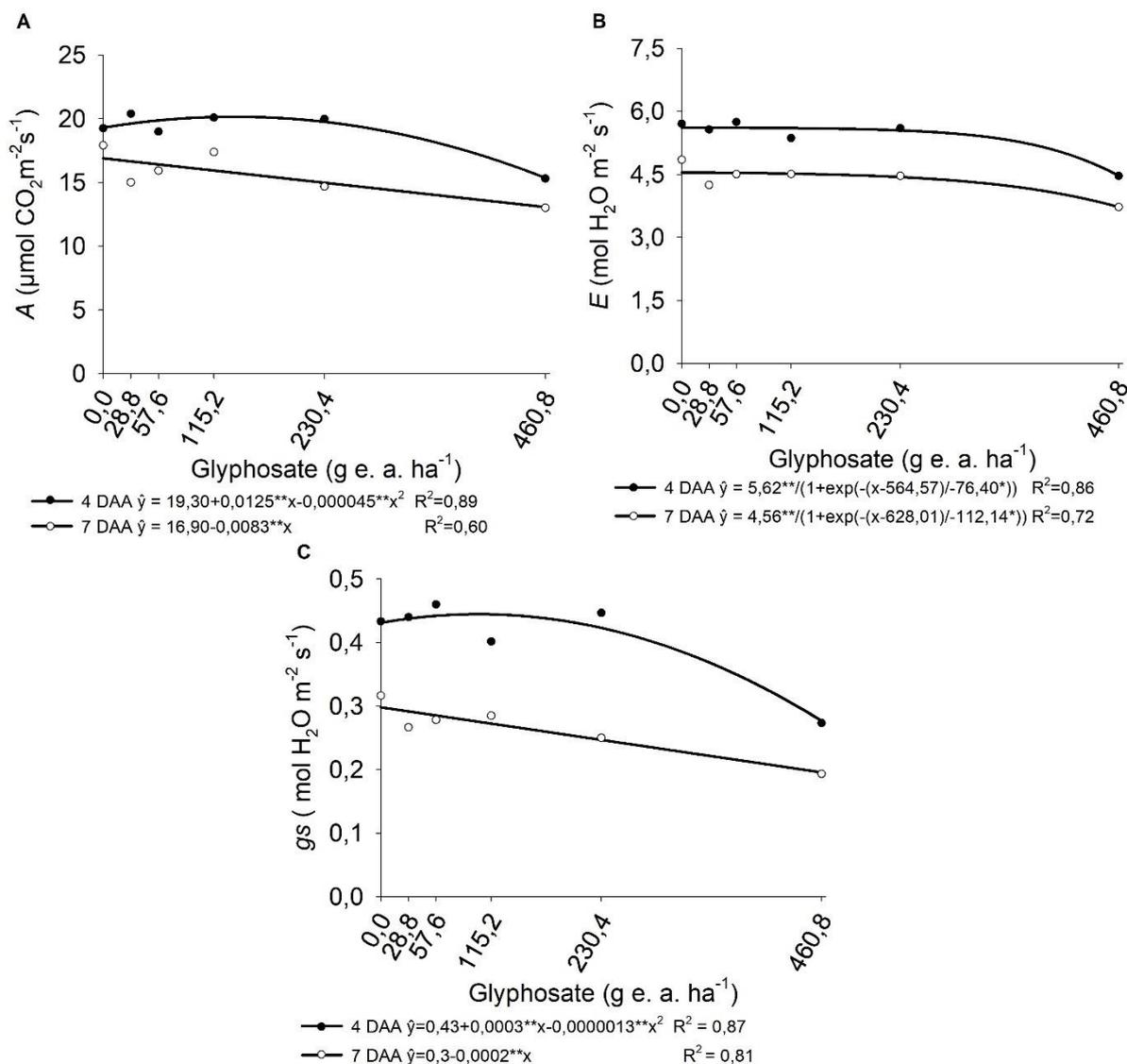


**Figura 4.** Incremento em altura (A) e incremento em diâmetro (B) em plantas de *Peltophorum dubium* expostas à deriva simulada de glyphosate aos 45 dias após aplicação do herbicida. \*\* significativo pelo teste t ( $p \leq 0,01$ ).

### Resposta fisiológica e metabólica de *Peltophorum dubium* a deriva de glyphosate

À deriva simulada de glyphosate em plantas de *P. dubium* provocou redução na fotossíntese (A), taxa de transpiração (E) e condutância estomática (gs) aos 4 e 7 DAA. Para ambas as variáveis essa redução é mais acentuada a partir da dose de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>. Considerando apenas as plantas expostas à dose de 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> aos 7 DAA pode-se observar para fotossíntese, transpiração e condutância estomática redução de 22,66%, 18,06% e 33,33%, respectivamente, em relação a testemunha (Figura 5 A – C).

Os resultados referentes a eficiência de uso da água (EUA), rendimento do fotossistema II ( $\Phi$  PSII), taxa de transporte de elétrons, clorofila a e clorofila b não apresentaram ajuste de regressão em função das doses de glyphosate, em deriva simulada. No entanto, plantas de *P. dubium* expostas as subdoses de glyphosate apresentaram valor médio de ( $\Phi$  PSII) e clorofila b superior em relação as plantas não tratadas com o herbicida, sendo as demais variáveis mantidas inalteradas (Tabela 1).



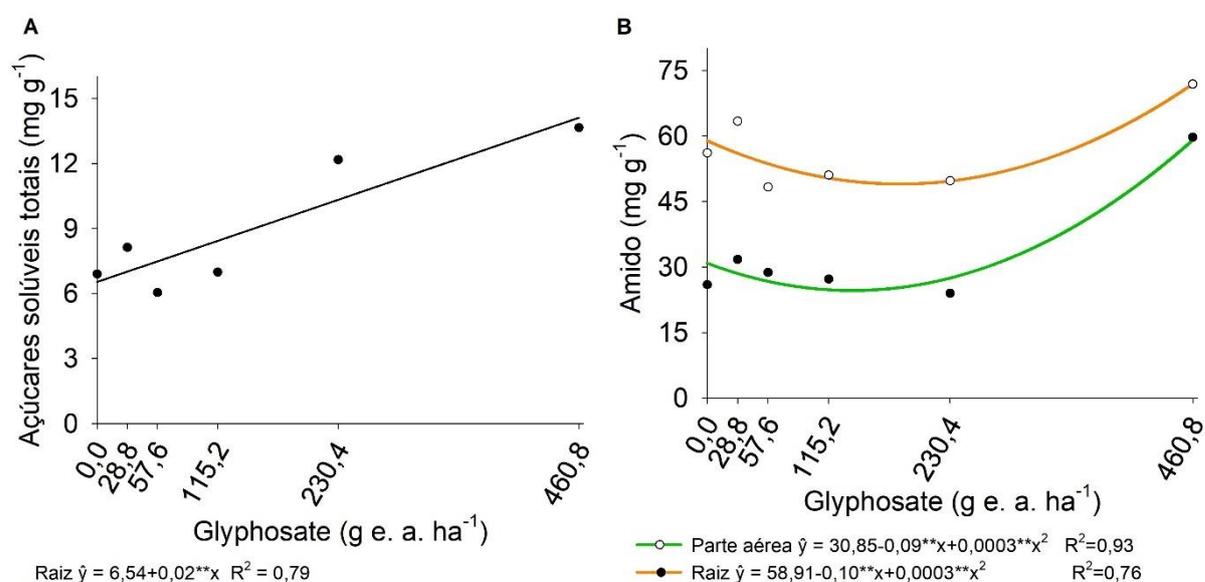
**Figura 5.** A - Taxa fotossintética (A), B - Transpiração (E) e C - Condutância estomática (gs) em plantas de *Peltophorum dubium* expostas a subdoses do herbicida glyphosate, em deriva simulada. \*\*, \* significativo pelo teste T a ( $p \leq 0,01$ ) e ( $p \leq 0,05$ ), respectivamente.

**Tabela 1.** Eficiência do uso da água (EUA), rendimento do fotossistema II ( $\Phi$  PSII), taxa de transporte de elétrons (ETR), clorofila a e clorofila b, em plantas de *Peltophorum dubium* expostas as subdoses de glyphosate.

	EUA	$\Phi$ PSII	ETR	Colorofila a	Clorofila b
	$\mu\text{mol CO}_2 /$ mol $\text{H}_2\text{O}$		$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$		
Sem herbicida	$3,52 \pm 0,06$	$0,42 \pm 0,01$	$95,23 \pm 22,49$	$25,14 \pm 0,48$	$4,72 \pm 0,22$
Deriva de Glyphosate*	$3,54 \pm 0,02$	$0,47 \pm 0,005$	$67,54 \pm 6,43$	$25,56 \pm 0,51$	$5,16 \pm 0,10$

\*Valores médios mais ou menos erro padrão de plantas expostas as cinco subdoses de glyphosate testadas.

O acúmulo médio de açúcares solúveis na parte aérea para testemunha foi de 33,91 mg g<sup>-1</sup> com erro padrão de 1,65 mg g<sup>-1</sup>, enquanto para as plantas expostas ao glyphosate o acumulado médio de açúcares solúveis foi 34,62 mg g<sup>-1</sup> com erro padrão de 0,45 mg g<sup>-1</sup>. Em decorrência da deriva de glyphosate houve aumento no acúmulo de açúcares solúveis totais na raiz (Figura 6A), já o acúmulo de amido ocorreu tanto na parte aérea quanto na raiz em *P. dubium* (Figura 6 B). Nas doses de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> e 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> o acúmulo de açúcares solúveis na raiz foi 70,48% e 141%, respectivamente, maior do que o acumulado na testemunha. As equações polinomiais quadráticas ajustadas para o acúmulo de amido na parte aérea e raiz indicam maior acúmulo na dose de 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup>.



**Figura 6.** Acúmulo de açúcares solúveis na raiz (A) e acúmulo de amido na parte aérea e raiz (B) em plantas de *Peltophorum dubium* sob deriva simulada de glyphosate. \*\* significativo pelo teste t ( $p \leq 0,01$ ).

## DISCUSSÃO

Plantas de *P. dubium* apresentaram sensibilidade ao herbicida glyphosate a partir da dose de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, enquanto nas doses inferiores apresentaram baixa intoxicação com sinais de recuperação ao longo do tempo. As principais respostas

sintomáticas causadas pela intoxicação, corresponderam a clorose seguida de necrose, tornando-se mais acentuadas nas maiores doses e ao longo do tempo após exposição ao herbicida, enrugamento foliar, desenvolvimento desigual de folíolos, brotação descontrolada e amarelecimento no ápice caulinar, além de redução do crescimento em altura e em diâmetro quando da aplicação de doses superiores a 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate. Essa dose, de acordo com Córdova et al. (2020), está dentro da faixa de subdoses do glyphosate que causa problemas de fitotoxicidade em até 400 m de distância da área alvo de aplicação, em seu estudo de deriva de glyphosate no cultivo de arroz. Ainda segundo os autores, identificaram-se morte e redução de produtividade em plantas de arroz entre 0 e 150 m de distância do local de aplicação, com taxa de deriva estimada em 268,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> e sintomas de intoxicação nas distâncias entre 200 e 400 m, com taxa de deriva em 249,6 g e. a. ha<sup>-1</sup> e 96 g e. a. ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Sintomas como clorose e necrose são relatados na literatura em plantas expostas a deriva de glyphosate para *Amburana cearensis* (Borges et al. 2021); *Handroanthus chrysotricus* (Mart. Ex DC) (Freitas-Silva et al. 2020); *Pouteria torta* (Rezende-Silva et al. 2019); *Eucalyptus urophylla* (Tuffi Santos et al. 2006) e redução na altura e diâmetro de plantas de *Theobroma cacao* L (Adu-Yeboah et al. 2023); *Cedrela odorata* (Pereira et al. 2015); *Eucalyptus urograndis* (Tuffi Santos et al. 2007).

A taxa de intoxicação foi maior a partir da dose de 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, sendo que para essa mesma dose foi observado decréscimo no acúmulo de massa seca, tanto para parte aérea quanto para raiz. Esse comportamento da taxa de intoxicação acompanhar o aumento das doses foi observado em outras espécies, a exemplo das espécies *Caryocar brasiliense* Camb. (Silva et al. 2016), *Genipa americana* L. (Gusmão et al. 2011), *Aspidosperma desmanthume* (Rondon-Neto et al. 2011) e

*Jatropha curcas* (Costa et al. 2009).

Os resultados referentes ao incremento em altura e diâmetro reforçam o comportamento observado nas avaliações de intoxicação e massa seca. O glyphosate interferiu negativamente no crescimento das plantas de *P. dubium*, sendo que aos 45 DAA foi observada diferença no incremento em altura e no diâmetro do caule entre as plantas controle não tratadas e as plantas expostas às doses superiores a 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate. O crescimento reduzido na dose de 460,8 g e. a. ha<sup>-1</sup> pode estar relacionado a gravidade da lesão causada por essa dose e ao tempo necessário para a recuperação (Adu-Yeboah et al. 2023). Yamada & Castro (2007) afirmam que a planta intoxicada com glyphosate apresenta crescimento da parte aérea e do sistema radicular reduzido, além de ficar suscetível a doenças, corroborando com os resultados obtidos nesse estudo.

Além disso, o estresse provocado pelo herbicida que acarreta redução no crescimento, sugere que o metabolismo prejudicado interfere na utilização de fontes de energia disponíveis na taxa esperada (Orcaray et al. 2012). Esse estresse está diretamente relacionado a impactos negativos no potencial fotossintético da planta (Ferreira et al. 2015).

O glyphosate atua nas plantas bloqueando a via do chiquimato, inibindo a atividade da enzima EPSPS, não sendo, portanto, a fotossíntese o alvo direto (Rezende-Silva et al. 2022). No entanto, nesse estudo, o glyphosate desencadeou efeitos negativos nos parâmetros de trocas gasosas, com redução na taxa fotossintética (*A*), taxa de transpiração (*E*) e na condutância estomática (*gs*) de plantas de *P. dubium* expostas a dose superior a 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, constatando que doses mais altas do herbicida em contato com a espécie causa danos ao metabolismo fotossintético. A redução na taxa fotossintética pode ter sido ocasionada pela limitação

estomática, evidenciada pela redução dos valores de condutância estomática e transpiração. Já que a fotossíntese depende diretamente do fluxo de CO<sub>2</sub> para dentro da célula e, por sua vez, o fluxo de CO<sub>2</sub> depende da abertura estomática (Messinger et al. 2006). O processo de absorção de CO<sub>2</sub> e perda de H<sub>2</sub>O em plantas ocorrem através dos estômatos, sendo o movimento estomático essencial para o controle das trocas gasosas (Nascentes et al. 2018). O mecanismo de controle das trocas gasosas nas plantas permite a abertura estomática que evita o estresse hídrico e ao mesmo tempo maximiza a fixação de carbono com o equilíbrio entre a absorção de CO<sub>2</sub> e a perda de água por transpiração (Nascentes et al. 2018). Dessa forma, o fechamento estomático causa impactos diretos na taxa de fotossíntese e transpiração.

Os resultados referentes as variáveis eficiência do uso da água (EUA), (ETR) clorofila a, não foram suficientes para identificar alterações no metabolismo das plantas controle não tratadas e as plantas expostas às doses de glyphosate. Já o rendimento quântico do fotossistema II e clorofila b para as plantas expostas às doses do herbicida, apresentaram diferença em relação as plantas controle.

A quantificação de parâmetros da fluorescência da clorofila em plantas é utilizada para avaliar o estado de estresse de uma planta através da análise do estado do sistema de transporte de energia do complexo fotossintético (Strasser et al. 1995; Lazár 1999). As moléculas de clorofila são responsáveis pela absorção da energia da luz, que pode ser usada para manter a atividade fotossintética da folha, ser dissipada na forma de calor ou ser reemitida como fluorescência. Estes três destinos possíveis da energia fornecida pela luz competem entre si e o aumento de um é realizado em função da diminuição dos outros (Maxwell & Johnson 2000).

A taxa de transporte de elétrons (ETR) é outro parâmetro importante da fluorescência da clorofila. Essa é uma medida em tempo real da atividade fotoquímica

dos fotossistemas, porém, é mais sensível às variações das condições ambientais em comparação com o rendimento quântico (Pimentel et al. 2011). O fluxo de elétrons do fotossistema II aponta, de modo geral, a taxa de fotossíntese e a ocorrência de danos ao fotossistema II, constituindo como a primeira manifestação de estresse na folha da planta (Maxwell & Johnson 2000). No presente estudo, as plantas expostas a deriva de glyphosate, não apresentaram redução da (ETR) em relação as plantas controle.

O fato das plantas expostas ao glyphosate não apresentarem redução na (ETR) indica que o herbicida não foi capaz de inibir a EPSPS, proteína que catalisa a formação de 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato a partir do chiquimato-3-fosfato e do fosfoenolpiruvato. Não interrompendo, portanto, a síntese dos aminoácidos aromáticos – fenilalanina, tirosina e triptofano (Barker & Dayan 2019). Visto que a tirosina atua como um precursor da plastoquinona (Maeda & Dudareva 2012), importante acceptor de elétrons na cadeia de transporte de elétrons entre os fotossistemas II e I (Buchanan & Wolosiuk 2017), e a eritrose-4-fosfato (Maeda & Dudareva, 2012), composto essencial na regeneração da ribulose-1,5-bifosfato no ciclo de Calvin-Benson (Buchanan & Wolosiuk 2017), participam da via do chiquimato.

Com relação aos parâmetros bioquímicos, as plantas de *P. dubium* expostas a dose de 460, g e. a. ha<sup>-1</sup> de glyphosate apresentam maior concentração de açúcares solúveis na raiz e amido na parte aérea e raiz, ressaltando-se que o acúmulo de amido na raiz dessas plantas foi superior ao acumulado na parte área.

Açúcares produzidos pela fotossíntese são transportados da fonte aos drenos não fotossintetizantes através do floema, assim o acúmulo de açúcares nos tecidos dreno desestimula a taxa de fotossíntese, bem como a mobilização de carboidratos (Taiz & Zeiger 2013). Dessa forma, a redução no consumo de fotoassimilados pela planta devido a inibição do crescimento provocada pelo glyphosate, pode responder

em parte a concentração de açúcares nas raízes e amido na parte aérea e raízes das plantas expostas ao herbicida. Yanniccari et al. (2012) reforçam que independente da inibição da fotossíntese, o glyphosate afeta os tecidos em crescimento, reduzindo a demanda por fotoassimilados, com consequente acumulação de carboidratos. Por outro lado, maior reserva de amido, faz com que a planta tenha maior possibilidade de restabelecer da intoxicação causada pelo glyphosate (Tuffi Santos et al. 2004).

A partir dos efeitos observados nos parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos de *P. dubium* em função das subdoses de glyphosate, percebe-se que a espécie é sensível ao herbicida, principalmente nas doses superiores a 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup>, quantidade compatível com o observado de contaminação por deriva do herbicida (Córdova et al. 2020). Entretanto, em doses inferiores a 230,4 g e. a. ha<sup>-1</sup> os sintomas de intoxicação são poucos perceptíveis, sendo essa determinada tolerância ao glyphosate importante para a sobrevivência da espécie, visto que está presente em áreas de Cerrado sujeitas a contaminação por glyphosate via deriva.

*P. dubium* é indicada tanto para recomposição de áreas degradadas (Carnevali et al. 2016) como para a produção de madeira em plantações comerciais (Bertolini et al. 2015), sendo necessário nessas áreas o uso de herbicidas no controle de plantas daninhas para a garantir melhores condições de desenvolvimento para a espécie de interesse. Dessa forma, a tolerância diferencial ao glyphosate apresentada pela espécie torna-se relevante, pois permite maior segurança no uso desse herbicida no controle de plantas daninhas nessas áreas sob aplicação dirigida. Por outro lado, a reduzida sensibilidade da espécie ao glyphosate, dificulta o seu uso no biomonitoramento, tendo em vista que as doses via deriva são baixas, sendo ideal, portanto, o uso de espécies mais sensíveis a doses baixas para ser utilizada como bioindicador.

## CONCLUSÕES

*P. dubium* expostas ao glyphosate apresentaram alterações nos parâmetros morfológicos, fisiológicos e bioquímicos, somente em doses superiores a 230,4 g e. a ha<sup>-1</sup>, com impactos no crescimento inicial das plantas, porém sem causar a morte das mudas.

As variáveis fisiológicas *A*, *gs*, e *E* por indicarem alterações apenas em doses superiores a 230,4 g e. a ha<sup>-1</sup>, torna-as não recomendadas para detecção de intoxicação por glyphosate em *P. dubium* em doses menores.

A partir do conjunto de respostas apresentada pela planta, como intoxicação, distúrbios fisiológicos e bioquímicos, é possível inferir que a deriva de glyphosate acarreta em baixo risco de danos para *P. dubium*.

A tolerância apresentada pela espécie revela a capacidade de sobrevivência em áreas sujeitas a deriva de glyphosate e uma possibilidade de uso do produto em seus cultivos, em aplicações dirigidas às plantas daninhas. Entretanto, a reduzida sensibilidade da espécie ao glyphosate, dificulta o seu uso no biomonitoramento da contaminação ambiental via deriva.

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado (COD 001) ao primeiro autor. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo financiamento de parte dos estudos.

## REFERÊNCIAS

- Adu-Yeboah P, Samuel TL, Maame AS, Sampson K, Prince P (2023) Physiological and Growth Responses of Cacao to Glyphosate Exposure. *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 58(2):91–99. <https://doi.org/10.1080/03601234.2023.21699523>
- Alencar A, Shimbo, JZ, Lenti F, Marques CB, Zimbres B, Rosa M, Arruda V, Castro, I, Ribeiro JPFM, Varela V, Alencar I, Piontekowski V, Ribeiro V, Bustamante MM, Sano EE, Barroso M (2020) Mapping Three Decades of Changes in the Brazilian Savanna Native Vegetation Using Landsat Data Processed in the Google Earth Engine Platform. *Remote Sensing* 12(6):924. <https://doi.org/10.3390/rs12060924>
- Agrofit-Sistemas de Agrotóxicos Fitossanitários (2023). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) do Brasil. [https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_coms/principal\\_agrofit\\_cons](https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_coms/principal_agrofit_cons)
- Barker AL, Dayan FE (2019) Fate of Glyphosate during Production and Processing of Glyphosate-Resistant Sugar Beet (*Beta Vulgaris*). *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 67(7):2061–65. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b05672>
- Batista PF, Costa AC, Megguer CA, Lima JS, Silva FB, Guimarães DS, Almeida GM, Nascimento KJT (2018) *Pouteria Torta*: A Native Species of the Brazilian Cerrado as a Bioindicator of Glyphosate Action. *Brazilian Journal of Biology* 78(2):296–305. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.07416>
- Bertolini ÍC, Debastiani AB, Brun EJ (2015) Caracterização Silvicultural da Canafístula (*Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert). *Scientia Agraria Paranaensis* 14(2): 67–76. <https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v14n2p67-76>
- Borges MPS, Silva DV, Souza MF, Silva TS, Teófilo TMS, Silva CCS, Pavão QS, Passos ABRJ, Santos JB (2021) Glyphosate Effects on Tree Species Natives from Cerrado and Caatinga Brazilian Biome: Assessing Sensitivity to Two Ways of Contamination. *Science of The Total Environment* 769:144113. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144113>
- Buchanan BB, Wolosiuk RA (2017) Fotossíntese: Reações de Carboxilação. In: Taiz L, Zeiger E, Moller I A, Murphy A, editors. *Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal*. (Artmed), Porto Alegre; p. 203–243.
- Carnevali NHS, Etenaldo FS, Daloso DM, Carnevali TO, Oliveira MT (2016) Sobrevivência e crescimento inicial de espécies arbóreas nativas implantadas em pastagem degradada. *Floresta* 46(2):277-286. <https://doi.org/10.5380/ufv.v46i2.42881>
- Carpenter DJ, Mathiassen SK, Boutin C, Strandberg B, Casey CS, Damgaard C (2020) Effects of Herbicides on Flowering. *Environmental Toxicology and Chemistry* 39(6):1244–56. <https://doi.org/10.1002/etc.4712>
- Cima IS, Amaral S, Massi KG (2023) Mapping Cerrado Remnants in an Anthropized Landscape in Southeast Brazil. *Remote Sensing Applications: Society and*

Environment 32:101032. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101032>

Climate-Data. org, (2023) Dados climáticos para cidades mundiais. <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/minas-gerais/montes-claros-2886/014..07416>.

Córdova RA, Tomazetti M, Refatti JP, Agostinetto D, Avila LA, Camargo ER (2020) Drift Distance in Aircraft Glyphosate Application Using Rice Plants as Indicators. *Planta Daninha* 38:e020223422. <https://doi.org/10.1590/s0100-83582020380100048>

Costa NV, Erasmo EAL, Queiroz PA, Dornelas DF, Dornelas BF (2009) Efeito da Deriva Simulada de Glyphosate No Crescimento Inicial de Plantas de Pinhão-Manso. *Planta Daninha* 27:1105–10. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582009000500024>

Cruvinel GT, Neves HI, Spira B (2019) Glyphosate Induces the Synthesis of ppGpp. *Molecular Genetics and Genomics* 294(1):191–98. <https://doi.org/10.1007/s00438-018-1499-1>

Cruz CES, Freitas-Silva L, Ribeiro C, Silva LC (2021) Physiological and Morphoanatomical Effects of Glyphosate in *Eugenia Uniflora*, a Brazilian Plant Species Native to the Atlantic Forest Biome. *Environmental Science and Pollution Research* 28(17):21334–46. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12003-4>

Dupont YL, Strandberg B, Damgaard C (2018) Effects of Herbicide and Nitrogen Fertilizer on Non-Target Plant Reproduction and Indirect Effects on Pollination in *Tanacetum Vulgare* (Asteraceae). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 262: 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.04.014>

Fales FW (1951) The Assimilation and Degradation of Carbohydrates by Yeast Cells. *Journal of Biological Chemistry* 193(1):113–24. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)52433-4](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)52433-4)

Ferreira EA, Matos CC, Barbosa EA, Silva DV, Santos JB, Pereira GAM, Faria AT, Silva CT (2015) Respostas Fisiológicas Da Mandioca à Aplicação de Herbicidas. *Semina: Ciências Agrárias* 36(2):645-656. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2015v36n2p645>

Ferreira MF, Torres C, Bracamonte E, Galetto L (2023) 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 Environment* 865:161091. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161091>

Frans RE, Talbert R, Marx D, Crowley H (1986) Experimental design techniques for measuring and analyzing plant responses to weed control practices. In: Camper N.D., editor. *Research methods in weed science*. 3rd. ed. Champaign: Weed Science Society. p.29-46.

Freitas-Silva L, Araújo TO, Nunes-Nesi A, Ribeiro C, Costa AC, Silva LC (2020) Evaluation of Morphological and Metabolic Responses to Glyphosate Exposure in Two Neotropical Plant Species. *Ecological Indicators* 113:106246. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106246>

Gusmão GA, Rondon Neto RM, Yasmashita OM (2011) Deriva simulada de glyphosate em plantas jovens de jenipapo (*Genipa americana* L.). Revista Brasileira de Herbicidas 10(1):13-19. <https://doi.org/10.7824/rbh.v10i1.91>

Ibama- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2022) Painéis de informações de agrotóxicos. <https://www.gov.br/ibama/t-br/assunto/s/químicos-e-biologicos/agrotoxicos/paineisde-infomacoes-deagrotoxicos/paineis-de-infomacoes-de-agrotoxicos#Painel-comercializacao>

Javaid Z, Ghazala, Ibrahim M, Mahmood A, Bajwa AA (2023) Pesticide Contamination of Potable Water and Its Correlation with Water Quality in Different Regions of Punjab, Pakistan. Water 15(3):543. <https://doi.org/10.3390/w15030543>

Kisvarga S, Hamar-Farkas D, Horotán K, Inotai K, Mörtl M, Neményi A, Székács A, Orlóci L (2023) Morphological, Histological, and Glyphosate Residue Analysis of *Helianthus Annuus* L. Plants Treated with Glyphosate. Agriculture 13(5):1014. <https://doi.org/10.3390/agriculture13051014>

Lazár D (1999) Chlorophyll a Fluorescence induction. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics, 1412(1):1–28. [https://doi.org/10.1016/S0005-2728\(99\)00047-X](https://doi.org/10.1016/S0005-2728(99)00047-X)

Lima DA, Müller C, Costa AC, Batista PF, Dalvi VC, Domingos M (2017) Morphoanatomical and Physiological Changes in *Bauhinia Variegata* L. as Indicators of Herbicide Diuron Action. Ecotoxicology and Environmental Safety 141:242–50. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.03.038>

Lucadamo L, Corapi A, Gallo L (2018) Evaluation of Glyphosate Drift and Anthropogenic Atmospheric Trace Elements Contamination by Means of Lichen Transplants in a Southern Italian Agricultural District". Air Quality, Atmosphere & Health 11(3):325–39. <https://doi.org/10.1007/s11869-018-0547-7>

Maeda H, Dudareva N (2012) The Shikimate Pathway and Aromatic Amino Acid Biosynthesis in Plants. Annual Review of Plant Biology 63(1):73–105. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042811-105439>

MapBiomas (2023) Área de agropecuária no Brasil cresceu 50% nos últimos 38 anos. <https://brasil.mapbiomas.org/2023/10/06/area-de-agropecuaria-no-brasil-cresceu-50-nos-ultimos-38-anos/>

Maxwell K, Johnson GN (2000) Chlorophyll Fluorescence-a Practical Guide. Journal of Experimental Botany 51(345):659–68. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.345.659>

McCready RM, Guggolz J, Silveira V, Owens HS (1950) Determination of Starch and Amylose in Vegetables. Analytical Chemistry 22(9):1156–58. <https://doi.org/10.1021/ac60045a016>

Messinger SM, Buckley TN, Mott KA (2006) Evidence for Involvement of Photosynthetic Processes in the Stomatal Response to CO<sub>2</sub>. Plant Physiology 140(2):771–78. <https://doi.org/10.1104/pp.105.073676>

Nascentes RF, Carbonari CA, Simões PS, Brunelli MC, Velini ED, Duke SO (2018) Low Doses of Glyphosate Enhance Growth, CO<sub>2</sub> Assimilation, Stomatal Conductance and Transpiration in Sugarcane and Eucalyptus. *Pest Management Science* 74(5):1197–1205. <https://doi.org/10.1002/ps.4606>

Negrisola RM, Negrisola MM, Cesco VJS, Bianchi L, Gomes DM, Carbonari CA, Velini ED. Glyphosate (2023) Effect on *Merremia Aegyptia* Water Transpiration and Water Use Efficiency. *Crop Protection* 169:106237. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2023.106237>

Novotny E (2022) Glyphosate, Roundup and the Failures of Regulatory Assessment. *Toxics* 10(6):321. <https://doi.org/10.3390/toxics10060321>

Ofosu R, Agyemang ED, Márton A, Pásztor G, Taller J, Kazinczi G (2023) Herbicide Resistance: Managing Weeds in a Changing World. *Agronomy* 13(6):1595. <https://doi.org/10.3390/agronomy13061595>

Oliveira APA, Crispim-Filho AJ, Santos VRS, Costa AC, Silva KLF (2021) Physiological and morphoanatomic responses of *Bowdichia Virgilioides* Kunth. (Fabaceae) to Glyphosate. *Revista Árvore* 45:e4528. <https://doi.org/10.1590/1806-908820210000028>

Orcaray L, Zulet A, Zabalza A, Royuela M (2012) Impairment of Carbon Metabolism Induced by the Herbicide Glyphosate. *Journal of Plant Physiology* 169(1):27–33. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.08.009>

Pereira MRR, Souza GSFS, Fonseca ED, Martins D (2015) Subdoses de glyphosate no desenvolvimento de espécies arbóreas nativas. *Bioscience Journal* 31(2):326–32. <https://doi.org/10.14393/bj-v31n2a2015-21924>

Pimentel C, Oliveira RF, Ribeiro RV, Santos MG, Machado EC (2011) Características fotossintéticas de *Phaseolus vulgaris* L. *Hoehnea* 38(2):273–80. <https://doi.org/10.1590/S2236-89062011000200007>

R Core Team (2022) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Rezende-Silva SL, Costa AC, Pedroso ANV, Batista PF, Crispim-Filho AJ, Almeida GM, Nascimento KJT, Ferreira LL, Domingos M, Silva AA (2022) Morphophysiological Indicators of the Glyphosate Action on Brazilian Savanna Plants: A Multivariate Analysis. *Acta Physiologiae Plantarum* 44(73):1-16. <https://doi.org/10.1007/s11738-022-03409-3>

Rezende-Silva SL, Costa AC, Dyszy FH, Batista PF, Crispim-Filho AJ, Nascimento KJT, Silva AA (2019) *Pouteria Torta* ss a remarkable native plant for biomonitoring the glyphosate effects on Cerrado vegetation. *Ecological Indicators* 102:497–506. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.003>

Rondon Neto RM, Benetti E, Yamashita OM, Gusmão GA (2011) Fitotoxicidade de Peroba-Mica (*Aspidosperma Desmanthum*) submetidas à deriva de glyphosate.

Revista Brasileira de Herbicidas 10(2):103-109. <https://doi.org/10.7824/rbh.v10i2.108>

Schwaida SF, Cicerelli RE, Almeida T, Sano EE, Pires CH, Ramos, APM (2023) Defining priorities areas for biodiversity conservation and trading forest certificates in the Cerrado Biome in Brazil. *Biodiversity and Conservation* 32(6):1807–20. <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02578-y>

Seiler LK, Decoteau DR, Davis DD (2014) Evaluation of *Ailanthus Altissima* as a Bioindicator to Detect Phytotoxic Levels of Ozone. *Northeastern Naturalist* 21(4):541–53. <https://doi.org/10.1656/045.021.0405>

Silva FB, Costa AC, Müller C, Nascimento KT, Batista PF, Vital RG, Megguer CA, Jakelaitis A, Domingos M (2023) *Dipteryx Alata*, a tree Native to the Brazilian Cerrado, is sensitive to the herbicide nicosulfuron. *Ecotoxicology* 29(2):217–25. <https://doi.org/10.1007/s10646-019-02154-7>

Silva FB, Costa AC, Müller C, Almeida GM, Nascimento KJT, Batista PF, Vital RG, Silva DG, Megguer CA, Jakelaitis A, Domingos M (2022) Searching for biomarkers of early detection of 2,4-D effects in a native tree species from the brazilian Cerrado biome. *Journal of Environmental Science and Health, Part B* 57(1):71–80. <https://doi.org/10.1080/03601234.2022.2028528>

Silva LQ, Araújo ACF, Almeida GM, Crispim Filho AJ, Costa AC, Jakelaitis A (2016) Modificações fisiológicas em folhas de pequi (*Caryocar brasiliense*) causadas pela aplicação de glyphosate. *Revista Brasileira de Herbicidas* 15(2):165-74. <https://doi.org/10.7824/rbh.v15i2.472>

Silva TS, Rando JG, Carvalho DAS (2023) *Peltophorum* in Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB83567>

Strasserf RJ, Srivastava A, Govindjee (1995) Polyphasic chlorophyll *a* fluorescence transient in plants and cyanobacteria. *Photochemistry and Photobiology* 61(1):32–42. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1995.tb09240.x>

Taiz L, Zeiger E (2013) Fisiologia vegetal. In *Fisiologia vegetal*, p. 918.

Tuffi Santos LD, Machado AFL, Viana RG, Ferreira LR, Ferreira FA, Souza GVR (2007) Crescimento do eucalipto sob efeito da deriva de glyphosate. *Planta Daninha* 25(1):133–37. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000100014>

Tuffi Santos LD, Ferreira LR, Ferreira FA, Duarte WM, Tiburcio RAS, Machado AFL (2006) Intoxicação de eucalipto submetido à deriva simulada de diferentes herbicidas. *Planta Daninha* 24(3):521–26. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000300014>

Tuffi Santos LD, Meira RMSA, Santos IC, Ferreira FA (2004) Efeito do glyphosate sobre a morfoanatomia das folhas e do caule de *Commelina diffusa* E C. *benghalensis*. *Planta Daninha* 22(1):101–107. <https://doi.org/10.1590/S0100-8358200380100048>

Wołejko E, Wydro U, Odziejewicz JI, Koronkiewicz A, Jabłońska-Trypuć A (2022). Biomonitoring of Soil Contaminated with Herbicides. *Water* 14(10):1-19. <https://doi.org/10.3390/w14101534>

Yamada T, Castro PRC (2007) Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. Encarte do informações agronômicas N° 119. [http://www.ipni.net/publication/iabrasil.nsf/0/55DAE8ADB2C488C183257AA1005EE59B/\\$FILE/Jornal-119.pdf](http://www.ipni.net/publication/iabrasil.nsf/0/55DAE8ADB2C488C183257AA1005EE59B/$FILE/Jornal-119.pdf)

Yanniccari M, Tambussi E, Istilart C, Castro AM (2012) Glyphosate effects on gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of two *Lolium perenne* L. biotypes with differential herbicide sensitivity. *Plant Physiology and Biochemistry* 57:210–17. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.05.027>

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na tecnologia de aplicação, a deriva é considerada um dos maiores problemas, pois reduz a dose real aplicada sobre o alvo, além de ser uma fonte de intoxicação de trabalhadores e de contaminação ambiental, atingindo inclusive espécies não-alvo em fragmentos florestais adjacentes aos cultivos agrícolas.

Plantas jovens de *P. dubium* apresentaram sensibilidade ao picloram em doses reduzidas, sendo possível inferir que a espécie possui potencial de ser utilizada no biomonitoramento de ambientes sujeitos a contaminação por esse herbicida.

Por outro lado, o herbicida glyphosate apresentou baixo potencial ofensivo a espécie, causando danos apenas nas maiores doses testadas. O fato de a espécie ser pouco sensível ao glyphosate pode ser positivo, visto que *P. dubium* é recomendada na utilização em programas de recuperação de áreas degradadas, dessa forma, a reduzida sensibilidade da espécie ao glyphosate possibilita a utilização desse herbicida no controle de plantas daninhas nessas áreas, proporcionando melhores condições de crescimento e desenvolvimento para a espécie de interesse. Por outro lado, a reduzida sensibilidade da espécie ao glyphosate limita a sua utilização no biomonitoramento da contaminação da vegetação nativa por esse herbicida.

Ressalta-se ainda que o fato de um herbicida não apresentar elevada toxicidade para uma determinada espécie não quer dizer que não será tóxico para outras espécies. Dessa forma, a adoção de boas práticas para aplicação de herbicidas é imprescindível e devem ser levadas em consideração, evitando assim deriva para áreas adjacentes as áreas tratadas e o contato indesejado com espécies sensíveis não-alvo, como a *P. dubium*.