

CAROLINA PUCCI DE MORAES

**EFEITOS DE DOSES SUBLETAIS DE GLYPHOSATE NO CRESCIMENTO,
CONSUMO DE ÁGUA E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES EM *Urochloa decumbens***

Botucatu

2019

CAROLINA PUCCI DE MORAES

**EFEITOS DE BAIXAS DOSES DE GLYPHOSATE NO CRESCIMENTO,
CONSUMO DE ÁGUA E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES EM *Urochloa decumbens***

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Proteção de Plantas).

Orientador: Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini

Coorientadores: Dr. Te-Ming Paul Tseng
Dra. Giovanna Larissa Gimenes Cotrick
Gomes

Botucatu

2019

M827e

Moraes, Carolina Pucci

Efeitos de doses subletais de glyphosate no crescimento, consumo de água e absorção de nutrientes em *Urochloa decumbens* / Carolina Pucci Moraes. -- Botucatu, 2019

97 p. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu

Orientador: Edivaldo Domingues Velini

Coorientador: Te-Ming Paul Tseng; Giovanna Larissa Gimenes Cotrick Gomes

1. Aminoácidos aromáticos. 2. Capim-braquiária. 3. Herbicida. 4. Nutrição mineral. 5. Regulador de crescimento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título: **“EFEITOS DE DOSES SUB-LETAIS DE GLYPHOSATE NO CRESCIMENTO, CONSUMO DE ÁGUA E ABSORÇÃO DE NUTRIENTES EM *Urochloa decumbens*”**

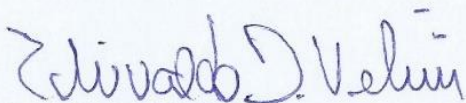
AUTORA: CAROLINA PUCCI DE MORAES

ORIENTADOR: EDIVALDO DOMINGUES VELINI

COORDENADOR: TE-MING PAUL TSENG

COORDENADORA: GIOVANNA LARISSA GIMENES COTRICK GOMES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (PROTEÇÃO DE PLANTAS), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. EDIVALDO DOMINGUES VELINI

Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP



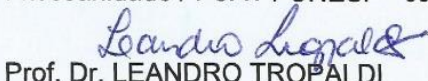
Prof. Dr. CAIO ANTONIO CARBONARI

Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP



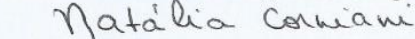
Prof. Dr. ROBINSON ANTONIO PITELLI

Fitossanidade / FCAV / UNESP - Jaboticabal



Prof. Dr. LEANDRO TROPALDI

Coordenadoria de Engenharia Agrônômica / Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas - Unesp



Dr.^a NATÁLIA CORNIANI

. / CABI - Centre for Agricultural Bioscience International

Botucatu, 08 de novembro de 2019.

À minha mãe Julieta, minha irmã Juliana e minha avó Keloisa,

por todo o apoio e amor que nunca me faltaram.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção, sabedoria e presença durante mais essa caminhada;

À minha mãe Julieta Pucci, minha irmã Juliana Pucci de Moraes e minha avó Heloisa Lourenção Pucci, que nunca mediram esforços para que eu pudesse alcançar os meus objetivos, sempre ao meu lado em todos os momentos;

Ao meu namorado Lucas Silva Barros, por todo o amor, apoio, paciência e por não me deixar desanimar diante dos momentos difíceis;

Ao Prof. Dr. Edivaldo Domingues Velini, pelo acolhimento, amizade, confiança e por tantas oportunidades. Sou grata pelos ensinamentos e conselhos partilhados durante a pós-graduação que foram fundamentais para a conclusão dessa jornada;

Ao Prof. Dr. Caio Antonio Carbonari pela atenção, disponibilidade e contribuições durante o doutorado;

Ao Dr. Te-Ming Paul Tseng pela coorientação e ensinamentos durante o período de doutorado sanduíche nos Estados Unidos, na Mississippi State University;

À Dra. Giovanna Larissa Gimenes Cotrick Gomes pela coorientação e pelas contribuições partilhadas para a conclusão da tese;

Às amigas Ana Karollyna Alves de Matos e Ivana Paula Ferraz Santos de Brito, pela amizade e companheirismo, por toda a ajuda durante os experimentos, pelos ensinamentos e pelos nossos bons momentos vividos diariamente;

Aos colegas Leandro Tropaldi, Diego Belapart, Roque de Carvalho Dias pela amizade, disponibilidade em ajudar, e pelas parcerias em diversos trabalhos realizados;

Ao Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia, e aos técnicos José Roberto M. Silva, José Guilherme Cordeiro e Marcelo Siono, que sempre estiveram dispostos a ajudar. Obrigada pelas colaborações e amizade;

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia: Proteção de Plantas e à Faculdade de Ciências Agronômicas, pela oportunidade e formação;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida;

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram na realização deste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

“A estrada da vida pode ser longa e áspera. Faça-a mais longa e suave.
Caminhando e cantando com as mãos cheias de sementes.”

Cora Coralina

RESUMO

A espécie *Urochloa decumbens* é uma das plantas mais importantes e frequentes em áreas com culturas perenes e em áreas não-agrícolas. Os efeitos secundários que ocorrem nas plantas pela aplicação de baixas doses de glyphosate ainda são pouco compreendidos. Desse modo, a hipótese dessa pesquisa foi de que as baixas doses de glyphosate podem suprimir o crescimento, reduzir a competição e permitir a sua utilização para manutenção da cobertura vegetal. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar os efeitos de doses subletais de glyphosate no crescimento, consumo de água, metabolismo e absorção de nutrientes em plantas de *U. decumbens*. Foram realizados três experimentos em casa de vegetação, seguindo delineamento em blocos casualizados, com três doses de glyphosate (0; 22,5 e 45 g e.a. ha⁻¹) e cinco repetições. As unidades experimentais utilizadas nos experimentos foram constituídas por duas estruturas plásticas acopladas, sendo a superior preenchida com 500 g de substrato comercial e semeada com *U. decumbens*, e a inferior com 650 mL de água. Aos 15 dias após a semeadura (DAS) realizou-se o desbaste, mantendo 20 plantas por unidade e aos 16 DAS a aplicação dos tratamentos utilizando pulverizador estacionário. Na primeira avaliação, de consumo de água, os três experimentos corresponderam aos períodos de avaliação em dias após aplicação (DAA), sendo feitas medições do volume de água remanescente na estrutura inferior a cada 48 horas, com reposição do volume inicial de 0-15 DAA; 0-30 DAA e rebrota das plantas (16-30 DAA). Ao término de cada experimento, procedeu-se a contagem dos perfilhos e coleta da parte aérea das plantas para a determinação de massa seca. Na sequência, calculou-se o coeficiente de transpiração aos 15 e 30 DAA. Na segunda avaliação, foram quantificados os teores de fenilalanina, tirosina, triptofano e dos ácidos chiquímico e quínico por cromatografia líquida e espectrometria de massas (LC-MS/MS). Na última avaliação, foram determinados os teores dos macronutrientes nas plantas. A aplicação de baixas doses de glyphosate reduziu o consumo de água acumulado, acúmulo de macronutrientes e a biomassa de plantas de *U. decumbens*, porém os efeitos observados foram mais intensos e mais persistentes na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. A aplicação da maior dose de glyphosate promoveu aumento do perfilhamento nas plantas. Os resultados de consumo de água, acúmulos de massa seca e de macronutrientes encontrados nos experimentos, demonstraram a efetividade da dose de 45 g e.a. ha⁻¹, indicando potencial uso para redução do crescimento ou manutenção da cobertura vegetal de plantas de *U. decumbens*. As baixas doses de glyphosate interferiram no metabolismo das plantas, com redução no acúmulo dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos nos períodos avaliados, com exceção da rebrota. A aplicação de baixas doses de glyphosate resultou em menor absorção de macronutrientes pelas plantas, com exceção do enxofre, até 15 DAA e durante a rebrota.

Palavras-chave: Aminoácidos aromáticos. Capim-braquiária. Herbicida. Metabolismo. Nutrição mineral. Regulador de crescimento.

ABSTRACT

The species *Urochloa decumbens* is one of the most important and frequent plants in perennial and non-agricultural areas. The secondary effects that occur on plants by the application of low doses of glyphosate, are still poorly understood. Thus, the hypothesis of this research was that low doses of glyphosate may suppress growth, reduce competition and allow the use for maintenance of vegetation cover. Therefore, the objective of this study was to evaluate the effects of sublethal doses of glyphosate on the growth, water consumption, metabolism and nutrient absorption on *U. decumbens* plants. Three greenhouse experiments were carried out, following a randomized block design with three doses of glyphosate (0, 22.5 and 45 g a.e. ha⁻¹) and five replications. The experimental units used in the experiments consisted of two coupled plastic structures, the upper one filled with 500 g of commercial substrate and sowed with *U. decumbens*, and the lower with 650 mL of water. At 15 days after sowing (DAS) plants were thinned, maintaining 20 plants per unit and at 16 DAS the application of treatments using a stationary sprayer. In the first evaluation, of water consumption, the three experiments corresponded to the evaluation periods in days after application (DAA), with measurements of the remaining water volume in the lower structure every 48 hours, with initial volume replacement from 0-15 DAA; 0-30 DAA and regrowth of plants (16-30 DAA). At the end of each experiment, the tillers were counted and the shoot plants was collected to determine the dry mass. Subsequently, the transpiration coefficient was calculated at 15 and 30 DAA. In the second evaluation, the contents of phenylalanine, tyrosine, tryptophan and shikimic and quinic acids were quantified liquid chromatography and mass spectrometry (LC-MS/MS). In the last evaluation, the macronutrients contents of plants were determined. The application of low doses of glyphosate reduced the accumulated water consumption, macronutrient accumulation and plant biomass of *U. decumbens*, but the observed effects were more intense and more persistent at the dose of 45 g a.e. ha⁻¹. The application of the highest dose of glyphosate increased plant tillering. The results of water consumption, dry matter accumulation and macronutrients found in the experiments demonstrated the effectiveness of the dose of 45 g a.e. ha⁻¹, indicating potential use for growth reduction or maintenance of the vegetation cover of *U. decumbens* plants. The low doses of glyphosate interfered in plant metabolism, with reduction in the accumulation of aromatic amino acids and phenolic acids in the evaluated periods, except for regrowth. The application of low doses of glyphosate resulted in lower macronutrient absorption by plants, except for sulfur, up to 15 DAA and during regrowth.

Keywords: Aromatic amino acids. Signalgrass. Herbicide. Metabolism. Mineral nutrition. Growth regulator.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1	Planta daninha.....	19
2.2	<i>Urochloa decumbens</i> (Capim-braquiária)	19
2.3	Glyphosate	22
2.3.1	Modo de ação do glyphosate	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1	Avaliação do consumo de água em plantas de <i>Urochloa decumbens</i>	31
3.2	Avaliação de compostos da rota do ácido chiquímico	32
3.3	Avaliação de absorção e disponibilidade de macronutrientes	34
3.4	Análise estatística	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1	Avaliação do consumo de água em plantas de <i>Urochloa decumbens</i>	36
4.2	Avaliação de compostos da rota do ácido chiquímico	50
4.3	Avaliação de absorção e disponibilidade de macronutrientes	66
5	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

As plantas daninhas podem de maneira direta ou indireta influenciar o crescimento, o desenvolvimento e a produtividade das plantas cultivadas. A interferência imposta por essas plantas em culturas de interesse econômico pode acarretar grandes prejuízos, como aumento nos custos de produção, dificuldade de colheita e depreciação da qualidade do produto final. No entanto, os efeitos negativos decorrem tanto do aumento na densidade de infestação quanto da duração e época da interferência (GHERSA; HOLT, 1995).

A espécie *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster está entre as plantas daninhas que causam grandes prejuízos na agricultura. A sua presença em áreas de cultivo pode gerar problemas quando competem pelos recursos do ambiente, como água, luz, nutrientes e espaço. Algumas características como adaptação a uma grande variedade de solos, facilidade de propagação por meio de sementes, rizomas e estolões, e desuniformidade na germinação, lhe conferem grande potencial de competição, tornando necessário o seu controle. Para reduzir a interferência causada por plantas de *U. decumbens* em áreas agrícolas e não-agrícolas, o controle químico pela aplicação de glyphosate é uma das opções disponíveis.

O glyphosate é um herbicida de amplo espectro de controle, não seletivo, e recomendado para aplicações em pós-emergência de plantas daninhas em culturas anuais e perenes. Em plantas, atua na inibição da atividade da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs, E.C. 2.5.1.19, CP4) na rota do ácido chiquímico, que é responsável pela síntese dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano, e que conseqüentemente interfere na produção de compostos secundários.

Embora o mecanismo de ação do glyphosate seja amplamente conhecido, os efeitos secundários observados em plantas causados pelas baixas doses, como o chamado efeito hormesis ou pela interferência na síntese do AIA quando utilizado como maturador em cana-de-açúcar, ainda são pouco compreendidos.

O glyphosate mesmo em baixas concentrações pode promover uma série de alterações metabólicas e interferir no desenvolvimento das plantas. No entanto, os efeitos causados pelo herbicida são dependentes de inúmeros fatores tais como,

espécie, dose aplicada e estágio de desenvolvimento da planta (EKER et al., 2006; AHSAN et al., 2008).

A aplicação de herbicidas é uma das principais fontes de estresse para as plantas e quando são aplicados em pós-emergência, como o glyphosate, tanto de plantas daninhas como de culturas, podem afetar a fotossíntese e a atividade estomática, além de prejudicar o metabolismo e as funções fisiológicas das plantas.

Os nutrientes minerais desempenham funções vitais no metabolismo das plantas, sendo essenciais para o seu crescimento e desenvolvimento. Quando submetidas a condições de estresse por fatores bióticos e abióticos, como a ação de herbicidas, as plantas estão sujeitas à alterações dessas funções devido a distúrbios nutricionais.

Desse modo, apesar da grande utilização do glyphosate nos últimos anos como estratégia de controle de plantas daninhas em diversas culturas, os efeitos de doses subletais e as consequentes alterações fisiológicas em plantas são muitas vezes controversos em função das poucas informações na literatura.

A espécie *U. decumbens* é uma das plantas daninhas mais importantes e frequentes em áreas cultivadas com culturas perenes e em áreas não-agrícolas. Desse modo, a hipótese testada seria de que as baixas doses de glyphosate podem suprimir o crescimento, reduzir a competição e permitir o seu uso na manutenção da cobertura vegetal.

Assim, dispor de uma ferramenta de manejo de baixo custo e que permita reduzir o crescimento da planta, pode ser útil em áreas não-agrícolas, em culturas perenes e em sistemas de integração lavoura pecuária na produção de milho. Neste contexto, aplicar baixas doses de glyphosate pode ser uma solução para suprimir temporariamente o crescimento de plantas de *U. decumbens*.

Diante do exposto, o trabalho teve por objetivo avaliar os efeitos de doses subletais de glyphosate no crescimento, consumo de água, metabolismo e absorção de nutrientes em plantas de *U. decumbens*.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Planta daninha

O conceito mais empregado de planta daninha a define como sendo toda e qualquer planta que ocorre no local onde não é desejada (BEHRENS et al., 1956). Ao longo de sua evolução, essas plantas desenvolveram características que permitiram sua sobrevivência em ambientes agrícolas variados, dificultando o controle, tais como: habilidade competitiva, alta capacidade de produção de propágulos, desuniformidade no processo germinativo, capacidade de germinação e emergência a partir de grandes profundidades para algumas espécies, viabilidade dos propágulos em condições desfavoráveis, mecanismos alternativos de reprodução, facilidade de disseminação dos propágulos e rápido crescimento e desenvolvimento inicial (BRIGHENTI; OLIVEIRA, 2011).

A mato-competição é uma das principais interferências diretas causadas pelas plantas daninhas em culturas agrícolas e os recursos mais explorados na competição entre as espécies são os nutrientes minerais, luz, água e espaço (PITELLI, 1987). No entanto, as consequências da competição podem variar de acordo com o nível de infestação da área, as condições edafoclimáticas locais, as características da cultura, o período de convivência entre as invasoras e a cultura, e o biótipo dessas plantas encontrado na área (MONTEALEGRE; VARGAS, 1989).

Entre os recursos do ambiente pelos quais as plantas daninhas e cultura competem, a água disponível no solo é um dos mais importantes. A sua distribuição no solo depende da precipitação, evapotranspiração e movimentação pelo perfil do solo (RIZZARDI et al., 2001).

A competição por nutrientes minerais essenciais também é de grande importância, pois muitas vezes são limitados no ambiente. No entanto, a capacidade das plantas daninhas em extrair nutrientes do solo na competição com outra planta, dependerá da própria planta daninha e da espécie cultivada (MEDEIROS et al., 2016).

2.2 *Urochloa decumbens* (Capim-braquiária)

A espécie *Urochloa decumbens* (Stapf) R.D.Webster está entre as plantas daninhas mais problemáticas para a agricultura, especialmente em culturas florestais

e pomares de fruteiras tropicais e subtropicais (PEREIRA NICOLAU et al., 2010). Plantas do gênero *Urochloa* apresentam habilidade de sobreviver em ambientes adversos que contribuem para sua difícil erradicação.

De nome popular capim-braquiária, é uma gramínea forrageira, originária da África do Sul, com ocorrência também na África Oriental, pertencente à família Poaceae (KISSMANN; GROTH, 1999). Diversos cultivares foram introduzidos no Brasil, como o cultivar IPEAN (Instituto de Pesquisa Agropecuária do Norte - atual EMBRAPA), que ocupa áreas do estado do Mato Grosso, e o cultivar Basilisk, muito comum nos Cerrados.

Em regiões tropicais do Brasil, que compreendem os estados do Centro-Oeste e Sudeste, estima-se que 85% das áreas destinadas às pastagens sejam constituídas por capins do gênero *Urochloa*, destacando-se as espécies *U. decumbens* cv. Basilisk, *U. brizantha* cv. Marandu e *U. humidicola* (VALLE et al., 2009).

A espécie *U. decumbens* tem se tornado ao longo dos anos uma planta invasora bastante relevante em café, citros, eucalipto e frutíferas perenes. Em áreas onde foi introduzida como forrageira e que posteriormente passou a ser cultivada com milho e soja, essa espécie tornou-se uma importante planta daninha devido à alta capacidade adaptativa e dificuldade no manejo, também em áreas cultivadas com gramíneas (BIANCO et al., 2005; QUEIROZ et al., 2014). No estado de São Paulo, a sua presença nos canaviais infestados consegue reduzir a vida útil entre 2 ou 3 cortes (LORENZI, 2000).

A presença de *U. decumbens* pode causar prejuízos em diversas culturas, como observado por Bezutte et al. (1995), em que a partir de 4 plantas/m² o crescimento inicial de mudas de eucalipto foi afetado. Em cana-de-açúcar, estimou-se que a cada 3,26 g de matéria seca acumulada de *U. decumbens* resultou em reduções na produtividade próximas a 1 t ha⁻¹ (KUVA et al., 2003).

Em áreas de produção agrícola, pode formar populações de grande densidade se o banco de sementes no solo não for devidamente reduzido, uma vez que a *U. decumbens* apresenta desuniformidade germinativa (KUVA et al., 2001). Essa espécie também atua como hospedeira de pragas e doenças comuns à cultura e interfere na colheita (BIANCO et al., 2005).

A *U. decumbens* também apresenta efeito alelopático com culturas como algodão, milho, arroz, eucalipto, soja e trigo (SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2006; TIMOSSI et al., 2006). É uma espécie bastante competitiva com o eucalipto, especialmente no

estágio inicial de desenvolvimento da cultura, a qual interfere negativamente em função da elevada eficiência do uso da água, rápido crescimento inicial e alta produtividade de biomassa em solos com baixa fertilidade (FERREIRA et al., 2016).

Como cultura, é considerada uma excelente forrageira, com grande produção de massa foliar de boa qualidade, resistência ao pastejo intensivo e ao pisoteio, e adaptada para solos ácidos e de baixa fertilidade (MENDES-BONATO et al., 2001). É também uma espécie utilizada para a proteção do solo contra a erosão (KISSMAN; GROTH, 1999). Embora seja uma gramínea palatável, a sua forragem apresenta baixo valor nutritivo, principalmente durante o inverno (VALLE et al., 1989).

A produtividade das gramíneas forrageiras decorre da contínua emissão de folhas e perfilhos, importante para a restauração da área foliar após o corte ou pastejo, o que garante a perenidade dessas plantas (FAGUNDES et al., 2005). A espécie *U. decumbens* apresenta metabolismo do tipo C4 e exibe alterações em suas características morfológicas e químicas, associadas ao desenvolvimento, à maturidade fisiológica e à senescência natural da planta forrageira (SANTOS et al., 2004).

A *U. decumbens* é uma planta perene, ereta ou decumbente, com folhas densamente pilosas em ambas as faces. Se reproduz por meio de sementes, e vegetativamente através de rizomas e estolões (MARQUES, 2009).

A maioria das espécies do gênero *Urochloa*, incluindo a *U. decumbens*, reproduz-se por apomixia, em que o embrião se desenvolve a partir de divisões mitóticas de uma célula somática, originando sementes férteis, sem haver a união do núcleo reprodutivo do grão de pólen com a oosfera, resultando em uma progênie constituída de indivíduos que são iguais à planta mãe (VALLE; SAVIDAN, 1996), dificultando assim, o aumento da variabilidade genética (GOULART et al., 2008).

A dificuldade de controle dessas plantas ocorre em função das características morfológicas, grande quantidade de sementes no solo, além de algumas espécies serem capazes de produzir compostos alelopáticos que inibem o crescimento de outras forrageiras (RODRIGUES; RODRIGUES, 1996).

Para minimizar a competição dessas plantas em culturas de interesse agrônomo, o seu controle pode ser realizado pelo método químico, com o uso de herbicidas aplicados em pré-emergência e pós-emergência e métodos mecânicos ou culturais.

O controle químico por meio da aplicação de herbicidas é uma das opções disponíveis, além de ser um método eficiente e econômico (ALVINO et al., 2001), desde que usado de maneira correta sem prejudicar a cultura.

O herbicida que se destaca para o controle da *U. decumbens* é o glyphosate, sendo também uma das principais opções para o controle de plantas daninhas nos sistemas de produção agrícola em diversas regiões do mundo (HALTER, 2009).

2.3 Glyphosate

O glyphosate tem sido um dos herbicidas mais estudados pela comunidade científica nos últimos quinze anos (DUKE, 2018). Em plantas, atua na rota do ácido chiquímico inibindo a atividade da enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs) (KIRKWOOD; MCKAY, 1994), que resulta na inibição da biossíntese e redução da disponibilidade dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano (LUCHINI, 2009), os quais são precursores de outros compostos, como lignina, alcaloides, flavonoides e ácidos benzoicos (TAN et al., 2006; REDDY et al., 2008), essenciais para o crescimento e sobrevivência das plantas.

É um herbicida de amplo espectro de controle, não seletivo, exceto para as culturas geneticamente modificadas, recomendado para aplicações em pós-emergência de plantas daninhas em culturas anuais e perenes (DUKE; POWLES, 2008). O glyphosate pode ser comumente encontrado em diferentes formulações, como sal isopropilamina, dimetilamina, sódico, amônio e potássico.

Sua popularidade e uso cresceram por aspectos relacionados à segurança toxicológica e ambiental, facilidade de manuseio, modo de ação, redução de custos e eficácia (HALTER, 2009). Devido ao amplo espectro de ação e translocação em plantas daninhas que tornam o glyphosate um produto muito eficaz. Sua capacidade em translocar-se para tecidos meristemáticos em crescimento, permite também o controle de meristemas subterrâneos, rebentos, rizomas e outras estruturas vegetativas (DILL et al., 2010).

Além de reduzir a síntese de proteínas, esse herbicida diminui a atividade da enzima ribulose-bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco) e do ácido 3-fosfoglicérico, reduzindo a síntese de clorofila e interferindo na organização do aparelho fotossintético, aumenta a peroxidação de lipídeos (MARÍA et al., 2005; AHSAN et al.,

2008), estimula a produção de etileno e inibe a biossíntese do ácido indolacético (AIA) (KAPPES et al., 2012).

A síntese do glyphosate ocorre a partir de um hidrogênio amínico do aminoácido glicina, por um radical de éster fosfônico, o N-(fosfonometil) glicina. É considerado um ácido fraco, pertencente ao grupo químico das glicinas substituídas (LUCHINI, 2009).

As propriedades físico-químicas conferem ao glyphosate comportamento específico pelos seus atributos aparentemente adversos: alta solubilidade em água ($S_w = 11,6 \text{ g L}^{-1}$) e elevado potencial de sorção nos solos ($K_{oc} = 300 \text{ a } 20.100 \text{ L kg}^{-1}$). Tal comportamento diferenciado se deve, principalmente, aos três grupos funcionais ionizáveis existentes, sendo dois de caráter ácido, como o fosfônico ($-\text{H}_2\text{PO}_3$) e carboxílico ($-\text{COOH}$) e um de caráter básico, a amina ($-\text{NH}$). Todos juntos em uma molécula considerada pequena (fórmula molecular = $\text{C}_3\text{H}_8\text{NO}_5\text{P}$ e peso molecular = $169,1 \text{ g mol}^{-1}$) (REGITANO; CASTRO, 2009).

Em plantas tolerantes, o glyphosate é metabolizado apenas em pequenas extensões a ácido aminometil-fosfônico (AMPA) (REGITANO; CASTRO, 2009). No ambiente, sua principal rota de decomposição é a degradação via solo (FRANZ et al., 1997), por meio de uma grande variedade de microrganismos que utilizam o produto como fonte de energia e fósforo em processos aeróbicos e anaeróbicos, que o decompõem através de duas rotas catabólicas, produzindo AMPA e sarcosina (DICK; QUINN, 1995).

A molécula de glyphosate tem meia vida no solo em média de 24 dias, contudo, o tempo para sua dissipação varia com o tipo de solo e depende, principalmente, da taxa de formação de resíduos ligados e de biodegradação, além do histórico de aplicação do produto na área (GIESY et al., 2000).

2.3.1 Modo de ação do glyphosate

As etapas que devem ocorrer para que o herbicida exerça controle eficiente de plantas daninhas são: o contato com a planta; penetração (via apoplasto, reversível e sem gasto energético); absorção (via simplasto, irreversível e com gasto energético); translocação (entre órgãos, tecidos, células e organelas); metabolismo e outras formas de ativação ou inativação; e interação com o sítio de ação até o início de eventos que levam à paralisação do crescimento ou à morte das plantas (VELINI et al., 2009).

O glyphosate penetra nas plantas preferencialmente pelas folhas, sendo translocado principalmente pelo floema, em um processo bifásico, com rápida penetração inicial pela cutícula (WANG; LIU, 2007) seguida por absorção simplástica lenta (MONQUERO; SILVA, 2007). Em geral, esse movimento é influenciado pelas características da planta, condições ambientais, concentração do herbicida, surfactante utilizado e método de aplicação (RUITNER; MEINEN, 1998).

Após a entrada do herbicida pela cutícula e membrana plasmática dos tecidos fotossintetizantes, é necessário ocorrer a translocação, através de tecidos vasculares, em direção aos sítios-alvo do herbicida (SATICHIVI et al., 2000). Devido à sua mobilidade pelo floema, o glyphosate é rapidamente translocado para todas as partes da planta, ocorrendo das folhas fotossinteticamente ativas em direção às partes que utilizam os açúcares para crescimento, manutenção e metabolismo ou armazenamento, como raízes, tubérculos, rizomas e folhas jovens, porém tende a acumular-se em regiões meristemáticas (MONQUERO et al., 2004; YAMADA; CASTRO, 2007).

Como esse herbicida se movimenta através do simplasto, pulverizações em regiões de fonte (folhas maduras) permitem a translocação do herbicida para as regiões de dreno (de crescimento) no restante da planta, junto com os fotoassimilados. Entretanto, a distribuição de fotoassimilados translocados sofre alterações durante o ciclo da planta (MONQUERO et al., 2004). Assim, a translocação é facilitada por condições que favorecem a fotossíntese (DELLA-CIOPPA et al., 1986).

O glyphosate também pode penetrar nas plantas por outras rotas. Estudos mostraram que formulações solúveis em óleo permitiram que o herbicida penetrasse pela casca de espécies arbóreas (YAMADA; CASTRO, 2007).

A absorção de glyphosate deve ocorrer em cada célula que possui a enzima alvo (MORIN et al., 1997), por difusão facilitada ou por proteínas transportadoras de fosfato, denominadas phosphate transporter (PHT), presentes na membrana plasmática (MERVOSH; BALKE, 1991; DENIS; DELROT, 1993).

O sítio de ação do glyphosate é a enzima EPSPs (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase), que catalisa a ligação dos compostos chiquimato-3-fosfato (S3P) com fosfoenolpiruvato (PEP), formando 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato (EPSP) e fosfato inorgânico (PETERSON et al., 1996; KOGER et al., 2005; MARÍA et al., 2005; REDDY et al., 2008). Além de interromper a produção de aminoácidos aromáticos e seus precursores, a inibição da enzima EPSPs interfere na entrada de carbono na rota

(JENSEN, 1986), pelo aumento da atividade da enzima DAHPS, que catalisa a condensação de eritrose-4-fosfato com fosfoenolpiruvato, considerada a enzima reguladora da rota do ácido chiquímico (DEVINE et al., 1993).

A rota do ácido chiquímico faz parte do metabolismo apenas de plantas e microrganismos, mas é ausente em mamíferos. Essa rota tem como produtos principais os compostos fenólicos, que chegam a representar até 35% da biomassa vegetal (BOUDET et al., 1985).

Em condições normais de desenvolvimento, cerca de 20% de todo o carbono fixado pelas plantas pode ser direcionado para a rota do ácido chiquímico (HASLAM, 1993). Nas plantas, acredita-se que essa rota esteja limitada aos plastídeos (HERRMANN, 1995; WEBER et al., 2005).

Essa rota é a principal via metabólica na produção dos aminoácidos aromáticos, os quais não são somente utilizados para síntese proteica e enzimática, mas funcionam também como precursores de um grande número de metabólitos secundários (HERRMANN, 1995). Os aminoácidos aromáticos originam diversas famílias de compostos importantes na regulação do crescimento e na defesa das plantas, como os taninos condensados, vitamina E, ácido indolacético (AIA), ácido salicílico, lignina, antocianinas, flavonas, isoflavonoides, fenilpropanoides e cumarinas, necessários para o crescimento e desenvolvimento vegetal (VELINI et al., 2009).

A rota do ácido chiquímico é composta por sete passos metabólicos (Figura 1). O primeiro passo é a condensação dos intermediários do metabolismo de carboidratos: fosfoenolpiruvato (PEP) da glicólise e eritrose 4-fosfato da via pentose-fosfato, formando o 3-deoxi-d-arabino-heptulosonato-7-fosfato (DAHP), reação catalisada pela enzima homodimérica 3-deoxi-d-arabino-heptulosonato-7-fosfato sintase (DAHPS), ativada pelo triptofano e Mn^{2+} (BUCHANAN et al., 2000).

O segundo passo da rota é a eliminação do fosfato pela DAHP gerando o 3-desidroquinato (DHQ), que é catalisada pela DHQ sintase (DHQS). O terceiro e o quarto passos incluem reações de desidratação do DHQ a 3-desidrochiquimato (DHS) catalisada pela DHQ desidratase; e a redução reversível da DHS a chiquimato, catalisada pela chiquimato-desidrogenase ou chiquimato NADP⁺ oxidoreductase (MAEDA; DUDAREVA, 2012).

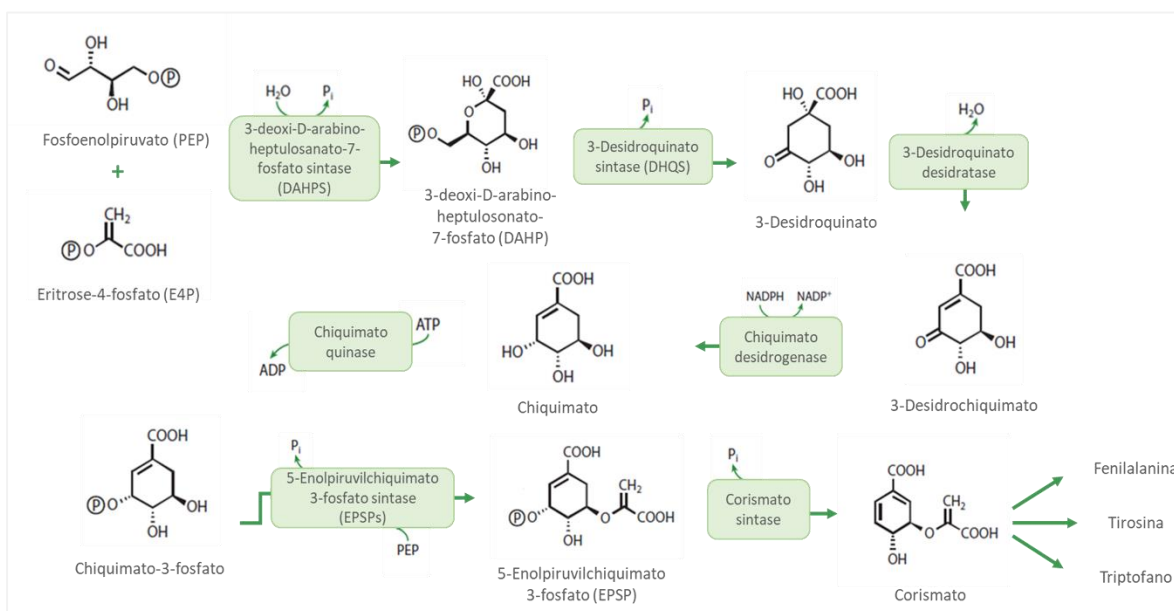
O quinto passo da rota consiste na fosforilação de chiquimato a chiquimato-3-fosfato (S3P), catalisada pela enzima chiquimato quinase. Em seguida ocorre a

entrada do segundo PEP, o qual é condensado com o S3P formando 5-enolpiruvilchiquimato 3-fosfato (EPSP) e fosfato inorgânico. Essa reação é catalisada de forma reversível pela enzima EPSP sintase (MAEDA; DUDAREVA, 2012), que representa o alvo molecular do glyphosate (STEINRUCKEN; AMRHEIN, 1980). Por último, a enzima corismato sintase catalisa o sétimo passo da rota, com a eliminação do fosfato pela EPSP para a produção do corismato (BALASUBRAMANIAN et al., 1990; HAWKES et al., 1990).

Alguns autores consideram que existe uma sobreposição dos sítios de ligação do PEP e do glyphosate na enzima EPSPs, uma vez que o glyphosate é um inibidor não competitivo com o S3P e competitivo com o PEP (HESS, 1993), indicando que o mesmo se liga aos dois substratos (MOUSDALE; COGGINS, 1991; DILL, 2005). Primeiro ocorre a ligação da enzima EPSPs ao S3P, e posteriormente a ligação com o PEP.

A sequência de ligações ocorre principalmente pela afinidade do glyphosate com o complexo EPSPs-S3P, que é 75 vezes maior do que a do PEP, enquanto que a velocidade de dissociação do glyphosate do sítio de ação é 2000 vezes mais lenta do que a do PEP (REAM et al., 1992).

Figura 1 - Esquema da rota do ácido chiquímico



Adaptado de Maeda; Dudareva, 2012

O efeito mais rápido e drástico da aplicação ou deriva de glyphosate em plantas sensíveis é o acúmulo de ácido chiquímico (AMRHEIN et al., 1980; MARÍA et al., 2006; MATALLO et al., 2009; REDDY et al., 2010), contudo pode ocorrer acúmulo de ácido quínico (ORCARAY et al., 2010), ácido desidrochiquímico (GOMES, 2011) e ácidos hidroxibenzóicos em folhas e outros órgãos, como ácidos protocatecuico e gálico (LYDON; DUKE, 1988; HERNANDEZ et al., 1999).

O glyphosate pode também interferir na síntese de ácido indolacético (AIA), um importante regulador vegetal, quando aplicado como maturador em cana-de-açúcar, exercendo um efeito secundário, como quebra da dominância apical e brotação de gemas laterais (VELINI et al., 2012).

Os sintomas que as plantas sensíveis apresentam após a aplicação de glyphosate desenvolvem-se lentamente, com morte ocorrendo em alguns dias ou até semanas. As folhas tornam-se amareladas, cloróticas e depois amarronzadas, seguido de necrose. Ocorre também enrugamento ou malformações (especialmente em áreas de rebrota), necrose de meristema, rizomas e estolões (YAMADA; CASTRO, 2007).

No entanto, os eventos pós-inibição da EPSPs pelo glyphosate e que levam as plantas à morte, não são claramente estabelecidos. A morte das plantas pode ser associada a três efeitos: a) falha na produção de um extenso conjunto de compostos derivados da rota; b) desregulação do fluxo de carbono ou a interferência na alocação do carbono e c) redução da síntese proteica em função da redução das concentrações de aminoácidos aromáticos (VELINI et al., 2009).

Uma importante análise prévia que auxilia na determinação dos danos provocados pelos herbicidas em plantas daninhas são as respostas fisiológicas (SILVA et al., 2016). Estudos demonstraram que o glyphosate interfere em alguns mecanismos fisiológicos como a fotossíntese, absorção de água, metabolismo do carbono, nutrição mineral e reações oxidativas, além de causar distúrbios nas interações planta-microrganismos (KREMER; MEANS, 2009; KIELAK et al., 2011; ZOBIOLE et al., 2012).

A fotossíntese não é o primeiro alvo da inibição pelo glyphosate, mas pode ser afetada pelo herbicida. Após a aplicação, o desvio de carbono que ocorre na rota de síntese do ácido chiquímico reduz a ribulose bifosfato (Rubisco), seguido por redução na taxa de assimilação de CO₂ e aumento na condutância estomática. Nesse caso, a interferência na fotossíntese pela aplicação de glyphosate é indireta, devido aos seus efeitos secundários (MADSEN et al., 1995). O glyphosate pode também reduzir a

transpiração em algumas plantas, provavelmente por afetar diretamente as células-guarda, causando o fechamento dos estômatos (SHANER, 1978).

O consumo de água pelas plantas também é uma forma de avaliar a atuação dos herbicidas. Em estudo realizado com arroz, Macedo (2018) observou que doses iguais ou superiores a 36 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate reduziram o consumo de água, possivelmente por terem afetado a absorção e/ou a transpiração das plantas tratadas, em função do estresse químico causado pelo herbicida.

As plantas superiores demandam macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo, Si) durante seu desenvolvimento, os quais desempenham funções vitais no seu metabolismo. Em plantas suscetíveis, os herbicidas atuam alterando os processos fisiológicos, bioquímicos, podendo influenciar na nutrição das culturas (DUKE et al., 2012; GOMES et al., 2014), e a aplicação de glyphosate pode alterar de algum modo a disponibilidade de determinados macronutrientes (MESCHÉDE et al., 2009).

O desbalanço nutricional das plantas já foi descrito na literatura como um dos efeitos do glyphosate (ZOBIOLE et al., 2010; SERRA et al., 2011; PETER et al., 2016). Entretanto, os efeitos sobre a nutrição mineral de plantas sensíveis e tolerantes ao herbicida são contraditórios. Existem estudos que demonstram que mesmo em doses baixas, o glyphosate pode causar alterações no teor de nutrientes das plantas após sua aplicação (BOTT et al., 2008; ÇAKMAK et al., 2009; FRANÇA et al., 2010). No entanto, existem autores que não encontraram efeitos negativos da aplicação do herbicida nos teores nutricionais (CORREIA; SANTOS, 2013; RABELLO et al., 2014).

Além disso, com a inibição da enzima EPSPs ocorre o acúmulo de altos níveis de chiquimato nos vacúolos, que é intensificado pela perda de controle do fluxo de carbono na rota (SINGH; SHANER, 1998; BRESNAHAN et al., 2003), e que resulta na desregulação do metabolismo energético (SVIRIDOV et al., 2015).

Alterações nos teores dos aminoácidos aromáticos após aplicação de glyphosate já foram observadas por diversos autores (COOLEY; FOY, 1992; WANG et al., 2001; PETERSEN et al., 2007; GRAVENA et al., 2009; ORCARAY et al., 2010; FERNÁNDEZ-ESCALADA et al., 2016), porém em alguns estudos, os padrões apresentados por cada aminoácido podem ser diferentes, dependendo da espécie e da dose estudada (ZABALZA et al., 2017).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em casa de vegetação no Núcleo de Pesquisas Avançadas em Matologia (NUPAM) da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Câmpus de Botucatu (22°84'S; 48°42'W Gr.), com temperatura de 27°C ± 2 °C e sem iluminação complementar.

Foram realizados três experimentos seguindo o delineamento em blocos casualizados, com os blocos correspondendo à duas épocas de cultivo. A primeira ocorreu entre os meses de janeiro e fevereiro de 2017 e a segunda entre março e abril de 2017. Nas duas épocas, foram testadas três doses de glyphosate com cinco repetições (Tabela 1).

A escolha das doses utilizadas nos experimentos foi baseada em estudos preliminares de dose-resposta com plantas de *U. decumbens*, nos quais observou-se que essas doses paralisaram o crescimento das plantas porém sem causar a morte das mesmas.

Tabela 1 – Doses de glyphosate em gramas de equivalente ácido e litros de produto comercial por hectare utilizadas nos experimentos

Tratamento	Dose (g e.a. ha ⁻¹)	Dose (L p.c. ha ⁻¹)
1	0,0	0,0
2	22,5	0,0625
3	45,0	0,1250

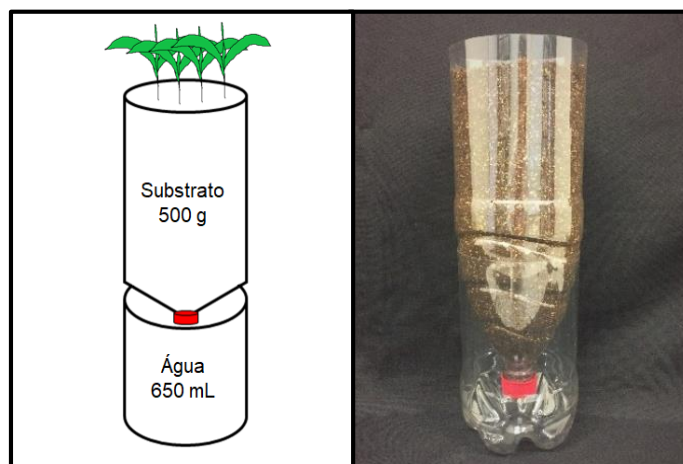
e.a.: Equivalente ácido; p.c.: Produto comercial.

As unidades experimentais corresponderam a recipientes plásticos (garrafas pet), compostos por duas estruturas acopladas. A estrutura superior com volume de 1,5 L foi preenchida com substrato comercial, e a inferior com volume de 1 L foi preenchida com água, conforme representado na Figura 2.

Os recipientes superiores foram preenchidos com 500 g de substrato comercial composto por turfa de esfagno, casca de arroz carbonizada e vermiculita, nos quais foram semeadas 60 sementes de *U. decumbens*. Após a semeadura, os recipientes foram irrigados pela superfície conforme necessário, até a emergência das primeiras

plântulas. O acoplamento dos recipientes permitiu o fechamento do sistema e garantiu que a única saída de água ocorresse por evapotranspiração.

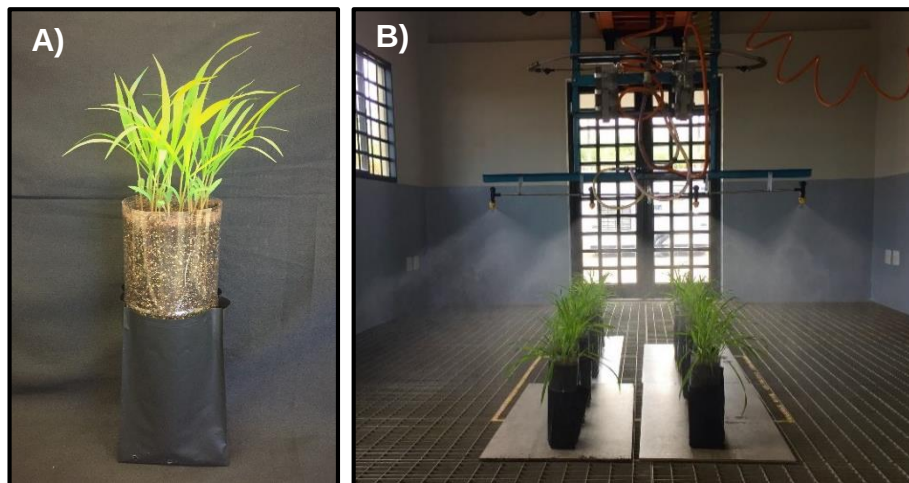
Figura 2 - Esquema das unidades experimentais utilizadas nos experimentos



Aos 11 dias após a semeadura (DAS), as estruturas inferiores foram preenchidas com 650 mL de água, permitindo assim a absorção de água pelo sistema. Após o preenchimento com água, as unidades experimentais foram acondicionadas em sacos plásticos pretos para evitar o desenvolvimento de organismos fotossintetizantes, como algas.

Aos 15 DAS, quando as plantas apresentavam cerca de 15 cm de altura realizou-se o desbaste, mantendo 20 plantas por unidade experimental e aos 16 DAS foi realizada a aplicação do herbicida glyphosate (Roundup Original® CS, 360 g e.a. L⁻¹). Para isso, utilizou-se um sistema de pulverização com controle da velocidade e pressão de trabalho instalado em sala fechada, equipado com uma barra de pulverização com 2,0 m de largura e quatro pontas TeeJet XR 110.02 VS, espaçadas em 0,5 m e posicionadas a 0,5 m de altura em relação às plantas. O sistema operou com velocidade de deslocamento de 3,6 km h⁻¹ e volume de calda de 200 L ha⁻¹, sob pressão constante de 150 kPa, pressurizado por ar comprimido (Figura 3). Após a aplicação dos tratamentos, foram selecionadas cinco unidades experimentais e coletadas 20 plantas por unidade para determinação da biomassa inicial dos experimentos.

Figura 3 – Detalhe das plantas de *Urochloa decumbens* no momento da aplicação (A); Sistema de pulverização utilizado para a aplicação dos tratamentos (B)



3.1 Avaliação do consumo de água em plantas de *Urochloa decumbens*

Os três experimentos corresponderam aos períodos avaliados em dias após aplicação (DAA). No primeiro experimento as avaliações ocorreram entre 0 e 15 DAA e no segundo entre 0 e 30 DAA. O terceiro experimento foi considerado como sendo uma segunda avaliação do primeiro experimento e que correspondeu à rebrota das plantas após o corte da parte aérea aos 15 DAA, sendo as avaliações da rebrota realizadas entre 16 e 30 DAA.

Em todos os experimentos, o consumo de água foi monitorado por meio de medições do volume de água remanescente na estrutura inferior utilizando-se uma proveta graduada, com reposição do volume inicial de 650 mL. Desse modo, definiu-se um intervalo de 48 horas de monitoramento até o período final das avaliações de cada experimento. Um dia antes da aplicação dos tratamentos foi realizada a primeira avaliação do consumo de água, representada pelo dia zero.

Ao término das avaliações de cada experimento, procedeu-se a contagem dos perfilhos e coleta da parte aérea das plantas das unidades experimentais para a determinação de massa seca (MS), dando continuidade às seguintes avaliações. Para isso, o material vegetal foi pesado em balança de precisão (0,0001 g) e em seguida acondicionado em sacos de papel e levado para secagem em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até atingir massa constante.

Na sequência, nas avaliações de 15 DAA e 30 DAA foi calculado o coeficiente de transpiração (CT), o qual é utilizado como indicador na comparação da eficiência do uso de água pelas plantas (SILVA et al., 2004). O coeficiente de transpiração foi dado pela relação entre o consumo total de água nos respectivos períodos e o acúmulo de biomassa, de acordo com a equação:

$$CT \text{ (mL g MS}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Consumo de água total em cada tratamento (mL)}}{(\text{Biomassa seca final (g)} - \text{Biomassa seca inicial (g)})}$$

3.2 Avaliação de compostos da rota do ácido chiquímico

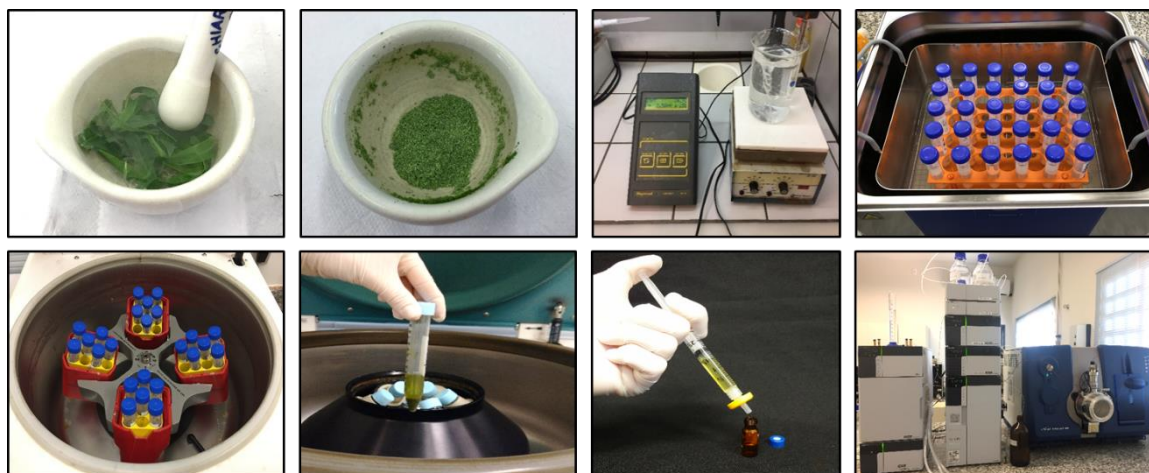
Na avaliação dos compostos da rota do ácido chiquímico, foram determinados os teores de fenilalanina, tirosina, triptofano, ácido chiquímico e ácido quínico, além de glyphosate e seu principal metabólito, o AMPA, nas plantas de *U. decumbens*.

Nos três experimentos, após a coleta da parte aérea das unidades experimentais, retirou-se amostras aleatórias referentes aos períodos avaliados, que em seguida foram pesadas e armazenadas em freezer a -80 °C. O material vegetal armazenado foi macerado em almofariz com o auxílio de nitrogênio líquido. Na sequência, as amostras foram submetidas ao processo de liofilização por 72 horas (Liofilizador Alpha 1-2 LDplus - Martin Christ).

Logo após, pesou-se 0,2 g do material liofilizado em tubos falcon de 15 mL, nos quais foram adicionados 10 mL de água acidificada em pH 2,5 (MATALLO, 2009). Posteriormente, os tubos foram submetidos à sonicação por 30 minutos a 50 °C, e centrifugação a 4000 rpm durante 5 minutos a 20 °C (centrífuga Rotanta 460R), para decantação dos fragmentos vegetais. O sobrenadante foi filtrado em filtro de membrana porosa (Millex PVDF de 0,45 µm e 13 mm de diâmetro) e transferido para frascos tipo âmbar com capacidade de 2 mL, para posterior análise cromatográfica (Figura 4).

A determinação das concentrações dos compostos foi realizada por cromatografia líquida de alta eficiência e espectrometria de massas, pelo sistema LC-MS/MS, composto por um cromatógrafo líquido de alta eficiência (Prominence UFLC, Shimadzu), acoplado a um espectrômetro de massas (4500, Triple Quad, AB Sciex) híbrido triplo quadrupolo.

Figura 4 – Etapas do procedimento para extração de compostos da rota do ácido chiquímico das amostras de plantas de *Urochloa decumbens*



As condições cromatográficas para a quantificação dos compostos foram otimizadas para cada modo de ionização (Tabelas 2 e 3). Escolheu-se o modo de ionização da fonte (eletrospray - ESI), que permite a detecção e a separação dos compostos em uma única corrida para os modos positivo e negativo.

Tabela 2 - Condições cromatográficas utilizadas para quantificação dos compostos no modo de ionização negativo: ácido chiquímico, ácido quínico, glyphosate e AMPA

Coluna Analítica	Gemini 5 μ C18 110 Å (150mm x 4,6mm)
Fase móvel	Fase A (FA) = 5 mM acetato de amônio em água Fase B (FB) = 5 mM acetato de amônio em metanol
Gradiente	0 – 1 minuto = 30%FB e 70% FA 1 – 2,5 minutos = 50% FB e 50%FA 2,5 – 5 minutos = 50% FB e 50% FA 5 – 6,5 minutos = 75%FB e 25% FA 6,5 – 8,5 minutos = 75%FB e 25% FA 8,5 – 10 minutos = 90% FB e 10% FA 10 – 15 minutos = 90% FB e 10% FA 15 – 18 minutos = 30% FB e 70% FA
Fluxo	0,500 mL min ⁻¹

Tabela 3 - Condições cromatográficas utilizadas para quantificação dos compostos no modo de ionização positivo: fenilalanina, tirosina e triptofano

Coluna Analítica	Synergi 2,5 μ Fusion RP 110 Å
Fase móvel	Fase A (FA) = 5 mM acetato de amônio em água Fase B (FB) = 5 mM acetato de amônio em metanol
Gradiente	0 – 2 minutos = 10%FB e 90% FA
	2 – 4 minutos = 40% FB e 60%FA
	4 – 9 minutos = 95% FB e 5% FA
	9 – 12 minutos = 95%FB e 5% FA
	12 – 15 minutos = 10%FB e 90% FA
	8,5 – 10 minutos = 90% FB e 10% FA
	10 – 15 minutos = 90% FB e 10% FA
Fluxo	0,250 mL min ⁻¹

O acúmulo dos aminoácidos aromáticos, dos ácidos chiquímico e quínico, glyphosate e AMPA foi estimado multiplicando-se os teores de cada composto pela massa seca acumulada da parte aérea das plantas por unidade experimental.

3.3 Avaliação de absorção e disponibilidade de macronutrientes

Na avaliação de absorção e disponibilidade de macronutrientes em plantas de *U. decumbens* foram determinados os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) seguindo a metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). Para isso, após a determinação da massa seca das plantas, o material vegetal foi triturado em moinho elétrico e as amostras encaminhadas ao Laboratório de Análises Agrícolas e Ambientais Ltda. O acúmulo dos macronutrientes foi estimado multiplicando-se os teores de cada nutriente pela massa seca acumulada da parte aérea das plantas por unidade experimental.

Na sequência, foi calculada a absorção dos nutrientes aos 15 DAA, 30 DAA e na rebrota das plantas, dada pela relação entre o acúmulo de nutrientes e o consumo de água total em cada um dos períodos avaliados, de acordo com a equação:

$$\text{Absorção de nutrientes (mg MS L}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Acúmulo de nutrientes (mg MS)}}{\text{Consumo de água total (L)}}$$

3.4 Análise estatística

Na primeira avaliação, os dados de consumo de água foram expressos de forma acumulada e não acumulada, em porcentagem em relação à testemunha, e submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Na análise do número de perfilhos, massa seca, coeficiente de transpiração (CT) e absorção de nutrientes, os dados dos experimentos da primeira e segunda época de cultivo foram agrupados e submetidos à análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste t, a 5% de probabilidade.

Os dados dos teores e dos acúmulos dos compostos da rota do ácido chiquímico foram expressos em $\mu\text{g g MS}^{-1}$ e $\mu\text{g MS}$, respectivamente. Enquanto os dados dos teores e dos acúmulos dos macronutrientes foram expressos em mg g MS^{-1} e mg MS , respectivamente. Em ambas as avaliações, os dados obtidos dos experimentos da primeira e segunda época foram agrupados e submetidos à análise de variância pelo teste F, sendo as médias comparadas pelo teste t, a 5% de probabilidade.

As análises foram realizadas com o auxílio do programa estatístico SISVAR 5.6, sendo os gráficos elaborados pelo Sigmaplot (SYSTAT SOFTWARE, versão 12.0, San Jose).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação do consumo de água em plantas de *Urochloa decumbens*

Os valores referentes ao consumo de água não acumulado e acumulado em relação à testemunha das plantas de *U. decumbens* durante o período de 15 DAA encontram-se na Tabela 4.

No início das avaliações, tanto o consumo de água não acumulado como o acumulado pelas plantas mostrou-se similar entre as doses testadas. No entanto, a comparação entre os tratamentos indicou diferença significativa a partir dos 4 DAA na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ no consumo de água não acumulado. Assim, o menor valor no consumo foi observado aos 12 DAA, em que as plantas tratadas com a maior dose de glyphosate apresentaram redução em torno de 71% em relação às plantas não tratadas.

Quanto aos valores do consumo de água acumulado das plantas de *U. decumbens*, foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos a partir de 6 DAA também na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. O menor valor no consumo acumulado foi verificado aos 14 DAA, quando as plantas tratadas com a maior dose de glyphosate apresentaram consumo de água duas vezes menor em relação às plantas da testemunha.

Tabela 4 – Médias de tratamentos e resultados da análise estatística do consumo de água não acumulado e acumulado de plantas de *Urochloa decumbens* (% em relação à testemunha), em função das doses de glyphosate no período de 15 DAA

Consumo de água não acumulado					
DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)			DMS	Valor de F
	0	22,5	45		
0	100	100,45	103,42	22,13	0,08
2	100	100,15	96,56	13,45	0,25
4	100	83,29	72,47	20,49	5,21*
6	100	73,36	50,41	17,44	23,03*
8	100	59,33	40,00	13,69	56,91*
10	100	61,96	34,25	15,59	50,94*
12	100	48,65	29,24	12,38	99,18*
14	100	66,47	34,94	20,30	29,22*
Consumo de água acumulado					
DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)			DMS	Valor de F
	0	22,5	45		
0	100	100,45	103,42	22,13	0,08
2	100	100,32	100,52	14,56	0,004
4	100	94,20	90,44	15,35	1,11
6	100	86,71	76,04	9,37	18,65*
8	100	77,75	64,26	9,34	42,42*
10	100	72,74	54,73	10,26	56,10*
12	100	68,63	50,38	9,89	73,20*
14	100	68,25	47,68	8,47	110,10*

DAA: Dias após aplicação; DMS: Diferença mínima significativa; *Significativo a $p \leq 0,05$.

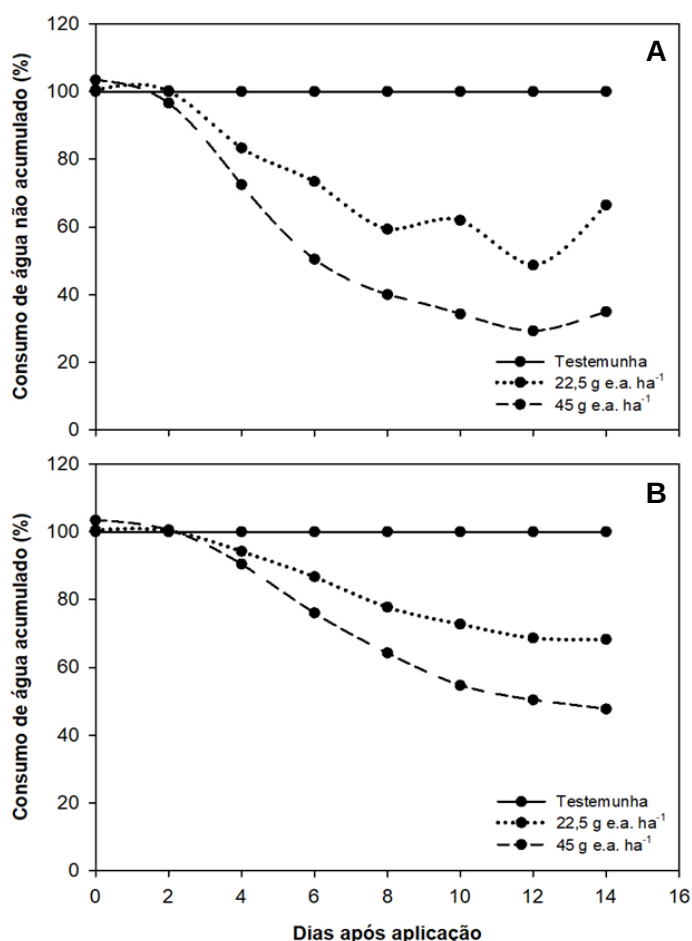
Os gráficos que descrevem o consumo de água não acumulado e acumulado das plantas de *U. decumbens* em porcentagem da testemunha no período de 15 DAA estão apresentados na Figura 5. Com relação ao consumo não acumulado, verificou-se que as plantas tratadas com glyphosate reduziram o consumo de forma significativa a partir dos 4 DAA, diminuindo até o período de 12 DAA (Figura 5A). Após esse período, as plantas retomaram o consumo de água em níveis crescentes nas doses de glyphosate aplicadas, porém inferiores à testemunha, demonstrando que a redução no consumo de água é um efeito temporário da aplicação do herbicida.

Uma característica importante que torna o glyphosate um produto bastante efetivo no controle de diversas plantas daninhas é sua rapidez na translocação, das folhas para outras partes da planta, como raízes, rizomas e meristemas apicais. Nesse experimento foi possível observar a pronta ação do herbicida, uma vez que a redução do consumo de água ocorreu aos 4 DAA.

Quanto ao consumo de água acumulado, reduções significativas ocorreram nas plantas tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ a partir de 6 DAA, sendo que essa redução estendeu-se até o final do experimento aos 14 DAA, porém manteve-se inferior ao consumo da testemunha (Figura 5B).

A ação do glyphosate em plantas daninhas pode reduzir a condutância estomática diminuindo a transpiração foliar, possivelmente devido ao fechamento dos estômatos e, conseqüentemente, afetar o consumo de água pelas plantas (ARALDI et al., 2011). No entanto, dependerá da dose aplicada, idade da planta e presença de surfactante (SHANNER, 1978).

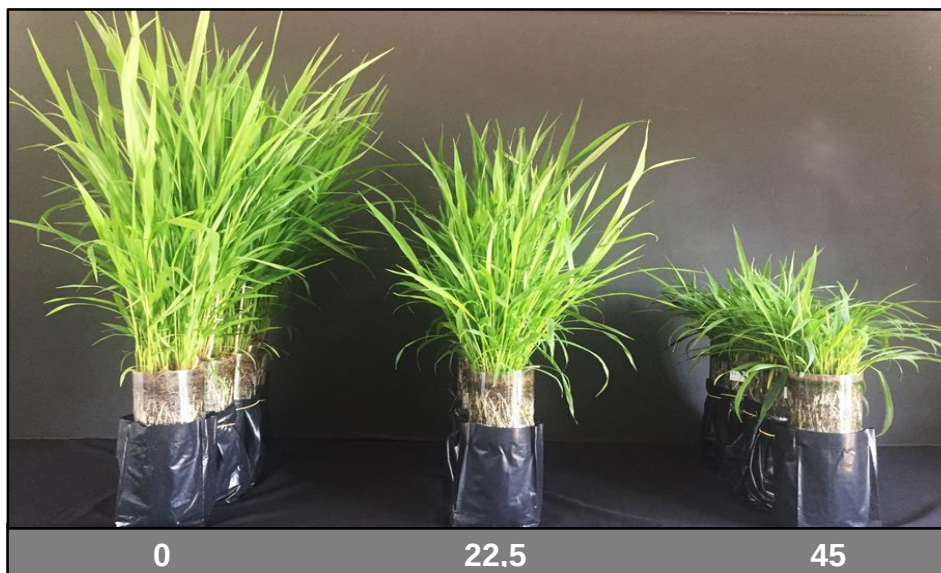
Figura 5 – Porcentagem de consumo de água não acumulado (A); porcentagem de consumo de água acumulado (B) de plantas de *Urochloa decumbens*, após aplicação de glyphosate no período de 15 DAA



Na Figura 6 pode-se observar como as plantas se encontravam ao final do experimento durante o período de 15 DAA, demonstrando desse modo, que a

aplicação de baixas doses de glyphosate paralisou o crescimento das plantas juntamente com o consumo de água, porém sem promover a morte das mesmas.

Figura 6 – Plantas de *Urochloa decumbens* 15 dias após aplicação de glyphosate



Os valores referentes ao consumo de água não acumulado e acumulado em relação à testemunha das plantas de *U. decumbens* durante o período de 30 DAA encontram-se na Tabela 5.

Foram observadas diferenças significativas em relação ao consumo de água não acumulado entre 6 e 16 DAA e aos 22 DAA entre as doses de glyphosate aplicadas. Aos 6 DAA as plantas tratadas com as doses de 22,5 e 45 g e.a. ha⁻¹ tiveram redução significativa do consumo de água, de 41% e 51% em relação à testemunha, respectivamente. No entanto, redução mais intensa no consumo ocorreu aos 12 DAA, quando as plantas tratadas com 45 g e.a. ha⁻¹ reduziram a quantidade de água consumida em 68% em relação às plantas da testemunha.

Com relação ao consumo de água acumulado, os resultados mostraram que no início das avaliações as plantas comportaram-se de modo similar, sem diferenças significativas entre as doses. A partir de 6 DAA, o consumo acumulado apresenta diferença significativa entre os tratamentos, com redução na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Aos 14 DAA verificou-se o menor valor do consumo de água acumulado pelas plantas

na maior dose de glyphosate, que promoveu redução em torno de 48% em relação à testemunha.

Tabela 5 – Médias de tratamentos e resultados da análise estatística do consumo de água não acumulado e acumulado de plantas de *Urochloa decumbens* (% em relação à testemunha), em função das doses de glyphosate no período de 30 DAA

Consumo de água não acumulado					
DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)			DMS	Valor de F
	0	22,5	45		
0	100	99,35	108,73	37,03	0,24
2	100	97,79	92,51	22,83	0,34
4	100	79,58	75,43	35,61	1,67
6	100	59,39	49,06	31,30	9,10*
8	100	60,28	45,88	15,84	38,49*
10	100	68,64	35,98	27,49	16,67*
12	100	56,23	31,84	15,30	62,62*
14	100	96,72	47,72	38,99	6,93*
16	100	97,39	69,25	24,93	5,75*
18	100	96,22	74,61	49,30	0,95
20	100	104,22	74,30	57,32	0,98
22	100	92,52	73,07	22,66	4,62*
24	100	95,02	73,09	51,75	0,94
26	100	120,78	118,85	42,05	0,91
Consumo de água acumulado					
DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)			DMS	Valor de F
	0	22,5	45		
0	100	99,35	108,73	37,03	0,24
2	100	98,69	101,86	24,35	0,05
4	100	92,00	92,60	25,42	0,37
6	100	79,21	75,53	13,50	11,74*
8	100	73,20	66,11	13,70	20,93*
10	100	71,86	57,27	15,42	24,39*
12	100	69,36	53,19	14,24	34,24*
14	100	74,09	52,25	9,55	76,97*
16	100	78,03	55,12	8,91	77,90*
18	100	80,72	58,00	11,38	41,90*
20	100	84,75	60,79	17,62	15,29*
22	100	85,75	62,38	13,77	23,39*
24	100	86,29	63,01	11,25	33,99*
26	100	88,80	67,07	12,62	21,64*

DAA: Dias após aplicação; DMS: Diferença mínima significativa; * Significativo a $p \leq 0,05$.

Os gráficos que descrevem o consumo de água não acumulado e acumulado das plantas de *U. decumbens* em porcentagem da testemunha no período de 30 DAA estão apresentados na Figura 7.

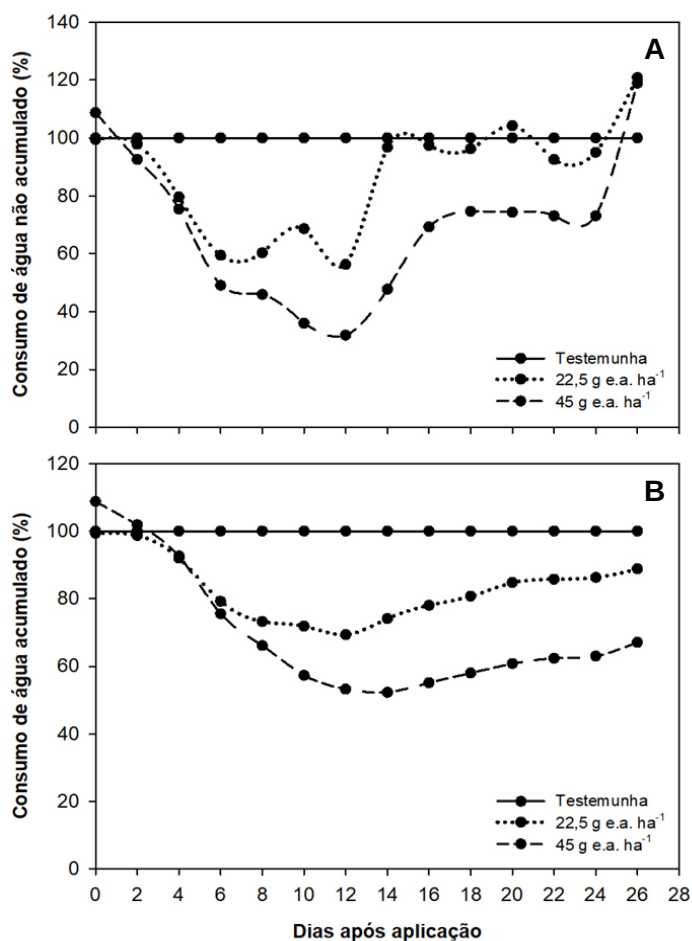
Analisando o consumo de água não acumulado, é possível observar que houve queda a partir de 6 DAA e continuou até 12 DAA, período em que o menor consumo de água ocorreu na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Após esse período, nota-se que as plantas tratadas com as duas doses de glyphosate voltaram a consumir mais água, em níveis próximos à testemunha, especialmente na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ (Figura 7A).

Com relação ao consumo de água acumulado, houve redução a partir de 6 DAA e se manteve até 14 DAA, período em que as plantas apresentaram menor consumo também na maior dose de glyphosate. Contudo, ocorreu retomada do consumo em níveis crescentes após esse período e que se estendeu até o final das avaliações, aos 26 DAA, quando o consumo ainda continuou inferior à testemunha, em torno de 33% na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ (Figura 7B).

Desse modo, o comportamento das plantas após aplicação de baixas doses de glyphosate no presente estudo indica que em caso de competição por água no ambiente entre as plantas daninhas e a cultura, o período a partir de 15 DAA deve ser acompanhado com maior atenção.

A aplicação de baixas doses de glyphosate pode promover efeitos no metabolismo das plantas, porém são rápidos e transitórios (GRAVENA et al., 2009). Esses efeitos são dependentes de fatores como, espécie, estágio fenológico, condições ambientais no momento das pulverizações, variedades das plantas e formulações do produto (VELINI et al., 2010; BELZ; DUKE, 2014). Desse modo, avaliar o consumo de água após aplicação de baixas doses de glyphosate pode ser utilizado como um indicador de intoxicação das plantas pelo herbicida.

Figura 7 – Porcentagem de consumo de água não acumulado (A); porcentagem de consumo de água acumulado (B) de plantas de *Urochloa decumbens*, após aplicação de glyphosate no período de 30 DAA



O glyphosate afeta a transpiração, possivelmente devido à condutância estomática (CARVALHO, 2013). Assim, a redução na transpiração foliar corrobora a hipótese do estresse causado pelo herbicida, desregulando o metabolismo e levando ao desarranjo na formação e manutenção das estruturas da planta, pela inibição da síntese dos aminoácidos aromáticos essenciais (VIDAL, 1997).

Em áreas cultivadas com culturas perenes, como citros, o período em que a planta daninha reduz o consumo de água, ou seja, quando o herbicida começa a atuar nos processos bioquímicos e fisiológicos, é também o momento em que a cultura pode se beneficiar na competição, aumentando sua área foliar, que auxilia no sombreamento e dificulta a sobrevivência da planta invasora.

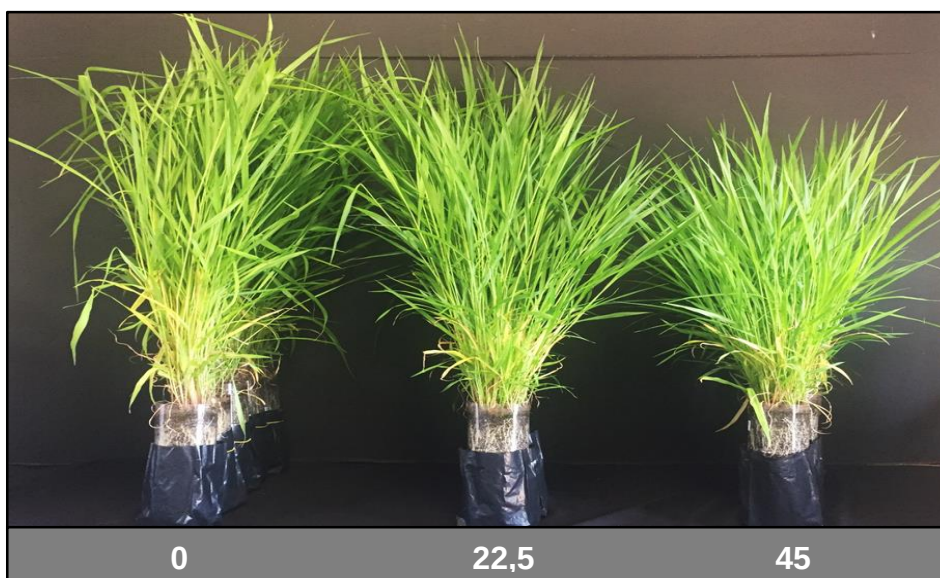
Assim, um exemplo de aplicação prática da utilização de baixas doses de herbicidas ocorre em áreas destinadas aos sistemas de integração lavoura pecuária. Nessas áreas, a *U. decumbens* pode ter o desenvolvimento suprimido

temporariamente pela aplicação de baixas doses de glyphosate, que causam estresse na planta, permitindo que a cultura implantada no consórcio obtenha vantagem e ultrapasse o período crítico de competição, ajudando no estabelecimento e crescimento da mesma (MACHADO; CECCON, 2010).

Além disso, considerando a implementação de um sistema para a manutenção do solo com cobertura vegetal, os resultados apresentados nesse estudo são importantes, pois auxiliam para a redução dos riscos do uso de glyphosate, uma vez que a aplicação de menores doses, o risco de contaminação ambiental também é menor, assim como o custo com o herbicida.

Na Figura 8 pode-se observar como as plantas se encontravam ao final do experimento durante o período de 30 DAA, demonstrando novamente que a aplicação de baixas doses de glyphosate paralisou o crescimento das plantas de *U. decumbens* juntamente com o consumo de água. Embora as plantas tratadas com glyphosate tenham se recuperado e retomado o consumo de água, o seu crescimento continuou sendo inferior à testemunha.

Figura 8 – Plantas de *Urochloa decumbens* 30 dias após aplicação de glyphosate



Os valores referentes ao consumo de água não acumulado e acumulado em relação à testemunha na rebrota das plantas de *U. decumbens* encontram-se na Tabela 6.

Os resultados obtidos no último experimento, quando avaliou-se a rebrota das plantas após o corte, mostraram variações na resposta das plantas quanto ao consumo de água não acumulado em relação aos experimentos anteriores. Houve diferenças significativas entre os tratamentos na terceira e na quarta avaliação após o corte, ou seja, aos 20 e 22 DAA, respectivamente. Nesse período, as plantas tratadas com glyphosate reduziram o consumo de água em relação à testemunha, sendo os menores valores verificados na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹. Já na última avaliação do experimento, aos 26 DAA, o consumo de água não acumulado entre as doses não apresentou diferença significativa.

Com relação ao consumo de água acumulado, diferenças significativas entre os tratamentos foram observadas nas avaliações de 22 e 24 DAA. Nesse período, as plantas tratadas com glyphosate reduziram o consumo de água em relação à testemunha, sendo o menor valor verificado na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ aos 24 DAA.

Tabela 6 – Médias de tratamentos e resultados da análise estatística do consumo de água não acumulado e acumulado de plantas de *Urochloa decumbens* (% em relação à testemunha), em função das doses de glyphosate na rebrota

Consumo de água não acumulado					
DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)			DMS	Valor de F
	0	22,5	45		
16	100	84,00	77,14	22,85	3,24
18	100	87,87	88,63	27,45	0,75
20	100	68,88	77,77	21,85	6,61*
22	100	72,63	76,31	20,28	6,59*
24	100	81,35	101,69	40,90	0,936
26	100	90,40	125,09	70,60	0,79
Consumo de água acumulado					
DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)			DMS	Valor de F
	0	22,5	45		
16	100	84,00	77,14	22,85	3,24
18	100	85,66	82,08	22,07	2,26
20	100	80,54	80,76	21,17	3,42
22	100	78,16	79,43	17,40	6,10*
24	100	78,86	84,30	20,64	3,47*
26	100	81,75	94,53	31,69	1,07

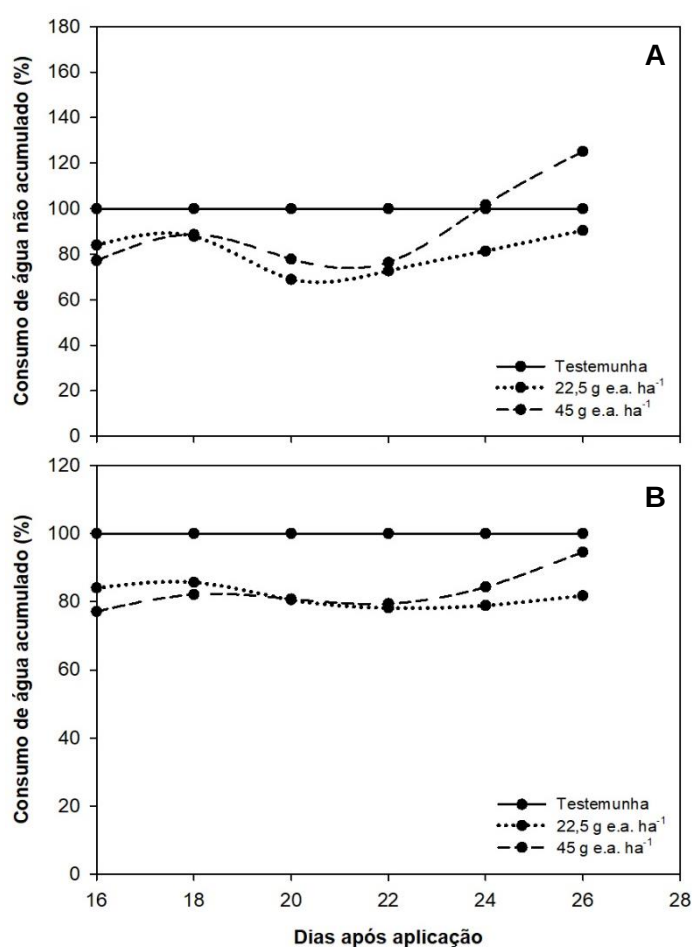
DAA: Dias após aplicação; DMS: Diferença mínima significativa; * Significativo a p≤0,05.

Os gráficos que descrevem o consumo de água não acumulado e acumulado das plantas de *U. decumbens* em porcentagem da testemunha durante a rebrota estão apresentados na Figura 9.

Analisando o consumo de água não acumulado, verificou-se que as plantas tratadas com glyphosate apresentaram redução no consumo de água aos 20 e 22 DAA. Assim como nos experimentos anteriores, essas plantas retomaram o consumo de água ao final das avaliações (Figura 9A).

Quanto ao consumo de água acumulado, as plantas também apresentaram redução nas doses de glyphosate testadas. Além disso, verificou-se aumento do consumo aos 24 DAA nas plantas tratadas com 45 g e.a. ha⁻¹ em relação à dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ (Figura 9B). Esse comportamento provavelmente se deve ao fato de que após o corte das plantas, a rebrota ocorreu com mais perfilhos na maior dose. Assim, o aumento no consumo de água de algum modo era esperado.

Figura 9 – Porcentagem de consumo de água não acumulado (A); porcentagem de consumo de água acumulado (B) de plantas de *Urochloa decumbens*, após aplicação de glyphosate no período da rebrota



Na Figura 10 pode-se observar como as plantas se encontravam ao final do experimento durante a rebrota. Mesmo após o corte, as plantas tratadas com 22,5 g

e.a. ha^{-1} de glyphosate apresentaram redução no crescimento em relação à testemunha. No entanto, as plantas que receberam a aplicação de 45 g e.a. ha^{-1} não diferiram da testemunha.

Figura 10 – Rebrota de plantas de *Urochloa decumbens* 15 dias após o corte da parte aérea



Ao final das avaliações do consumo de água, realizou-se a coleta da parte aérea das plantas de *U. decumbens* aos 15 DAA, 30 DAA e da rebrota, e procedeu-se a contagem dos perfilhos e determinação da massa seca conforme apresentado nas Tabela 7 e 8, respectivamente.

Quanto ao número de perfilhos, diferenças significativas ($p \leq 0,05$) foram encontradas entre as doses em todos os períodos de coleta, assim como os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com aplicação de glyphosate foram significativos ao nível de 5% de probabilidade para os períodos avaliados (Tabela 7).

Foi possível observar que nos períodos de 15 e 30 DAA, as plantas que receberam a aplicação de glyphosate aumentaram o número de perfilhos em relação às plantas da testemunha. Na rebrota, houve redução dos perfilhos quando as plantas foram tratadas com a dose de 22,5 g e.a. ha^{-1} , enquanto a dose de 45 g e.a. ha^{-1} não diferiu da testemunha. Nesse caso, o perfilhamento na maior dose compensou a morte das plantas em razão da aplicação do herbicida, em uma tentativa de sobrevivência.

Tabela 7 – Médias do número de perfilhos de plantas de *Urochloa decumbens* em função das doses de glyphosate aplicadas e períodos de coleta

Períodos	Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Perfilhos	F	Valor p
15 DAA	0	57	-	1
	22,5	66,85	14,00	<0,001
	45	68,75	19,93	<0,001
	F Doses		11,48	<0,001
	F Época		12,51	0,001
	DMS (t p≤0,05)	5,27		
	CV (%)	12,97		
30 DAA	0	61,20	-	1
	22,5	76,90	8,70	0,007
	45	102,70	60,81	<0,001
	F Doses		31,01	<0,001
	F Época		15,67	<0,001
	DMS (t p≤0,05)	10,94		
	CV (%)	14,83		
Rebrota	0	36,90	-	1
	22,5	23,60	11,13	0,003
	45	40,80	0,98	0,337
	F Doses		10,24	<0,001
	F Época		48,81	<0,001
	DMS (t p≤0,05)	8,19		
	CV (%)	26,39		

DAA: Dias após aplicação; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

A interferência do glyphosate na síntese do AIA pode exercer um efeito secundário com quebra da dominância apical e brotação de gemas laterais, por exemplo, quando utilizado como maturador em cana-de-açúcar (VELINI et al., 2012).

Carbonari et al. (2007) verificaram que a dose de 3,6 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate estimulou o crescimento, promovendo maior número de ramos laterais em eucalipto, contudo a subdose de glyphosate ideal para esse efeito varia de acordo com a espécie. Enquanto Macedo (2018) observou aumento no perfilhamento em arroz após a aplicação em R1 de doses superiores a 60 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Segundo Bertoncelli et al. (2018), uma outra hipótese que justifica o aumento de brotações laterais pela aplicação de baixas doses de glyphosate seria o aumento na absorção de fósforo, elemento que está diretamente ligado à divisão celular.

Quanto aos resultados de massa seca das plantas de *U. decumbens*, diferenças significativas (p≤0,05) entre as doses foram encontradas para todos os períodos de coleta e os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com aplicação de

glyphosate foram significativos ao nível de 5% de probabilidade para os três períodos avaliados (Tabela 8).

Aos 15 e 30 DAA, as plantas tratadas com glyphosate apresentaram reduções na massa seca, sendo os menores valores encontrados na dose de 45 g e.a. ha⁻¹, de 74,5% e 46%, respectivamente. No entanto, na rebrota das plantas, a maior redução de massa seca, em torno de 40%, ocorreu na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹.

Tabela 8 – Médias de massa seca de parte aérea de plantas de *Urochloa decumbens* em função das doses de glyphosate aplicadas e períodos avaliados

Períodos	Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Massa seca (g)	F	Valor p
15 DAA	0	14,86	-	1
	22,5	8,26	100,71	<0,001
	45	3,80	283,30	<0,001
	F Doses		143,40	<0,001
	F Época		0,02	0,883
	DMS (t p≤0,05)	1,32		
	CV (%)	23,15		
30 DAA	0	43,22	-	1
	22,5	33,95	24,76	<0,001
	45	23,33	114,17	<0,001
	F Doses		57,18	<0,001
	F Época		86,75	<0,001
	DMS (t p≤0,05)	3,83		
	CV (%)	12,42		
Rebrota	0	2,23	-	1
	22,5	1,33	8,76	0,006
	45	2,88	4,56	0,042
	F Doses		13,11	<0,001
	F Época		138,02	<0,001
	DMS (t p≤0,05)	0,63		
	CV (%)	31,75		

DAA: Dias após aplicação; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

As dosagens de glyphosate ocasionaram redução no acúmulo de massa seca, podendo esse fato ser explicado pela possível redução da fotossíntese, quando da aplicação do herbicida (YAMADA; CASTRO, 2007).

A faixa de doses em que o glyphosate não atua em plantas é bastante estreita, podendo ser apenas 0 a 1,8 g e.a. ha⁻¹ em algumas espécies, contudo existem estudos que encontraram efeitos secundários nessa faixa de doses. Há uma segunda faixa de doses em que podem ocorrer estímulos de crescimento e, uma terceira faixa, em geral

acima de 7,2 a 36 g e.a. ha⁻¹, na qual são verificados os efeitos inibitórios sobre plantas (VELINI et al., 2009).

Na avaliação do coeficiente de transpiração durante 15 e 30 DAA, diferenças significativas ($p \leq 0,05$) foram observadas entre as doses de glyphosate nos dois períodos avaliados (Tabela 9).

As plantas de *U. decumbens* apresentaram maior coeficiente de transpiração quando foram tratadas com glyphosate em comparação com as plantas que não receberam a aplicação, implicando em menor produção de biomassa, sendo mais afetada quando se aplicou 45 g e.a. ha⁻¹, com coeficiente de 308,65 mL g MS⁻¹ aos 15 DAA e de 139,34 mL g MS⁻¹ aos 30 DAA.

Tabela 9 – Coeficiente de transpiração, em função das doses de glyphosate aplicadas em plantas de *Urochloa decumbens* e períodos avaliados

DAA	Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Coeficiente de transpiração (mL g MS ⁻¹)	F	Valor p
15	0	141,17	-	1
	22,5	170,98	4,42	0,040
	45	308,65	139,61	<0,001
	F Doses		79,46	<0,001
	F Época		4,32	0,042
	DMS (t $p \leq 0,05$)	28,39		
	CV (%)	21,66		
30	0	110,08	-	1
	22,5	126,53	10,20	0,004
	45	139,34	32,29	<0,001
	F Doses		16,23	<0,001
	F Época		47,38	<0,001
	DMS (t $p \leq 0,05$)	10,58		
	CV (%)	9,19		

DAA: Dias após aplicação; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

As plantas que receberam a aplicação da maior dose apresentaram coeficiente de transpiração 118% superior aos 15 DAA e de 26% superior aos 30 DAA, para produzir a mesma massa seca que a testemunha. Esses resultados contribuem para reforçar a teoria de que a aplicação de baixas doses de herbicidas pode interferir nos processos fisiológicos das plantas, modificando o crescimento, o desenvolvimento ou a sua composição (VELINI et al., 2010).

A análise conjunta dos resultados de consumo de água, acúmulo de biomassa e coeficiente de transpiração indicou que as doses de glyphosate avaliadas reduziram o crescimento das plantas de maneira mais intensa que o consumo de água. Desse

modo, a razão entre o consumo de água e o aumento de biomassa, definida como coeficiente de transpiração, mostrou que o tratamento com o herbicida efetivamente tornou as plantas menos eficientes em utilizar a água para o seu crescimento. Em resumo, o glyphosate aumentou o coeficiente transpiratório das plantas de *U. decumbens*, mas afetou mais intensamente o seu crescimento, tendo como resultado final, a redução do consumo total de água.

4.2 Avaliação de compostos da rota do ácido chiquímico

Os valores referentes aos teores e acúmulos dos aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) e dos ácidos fenólicos (ácido chiquímico e ácido quínico) encontrados nas plantas de *U. decumbens* aos 15 DAA estão apresentados nas Tabelas 10 e 11, respectivamente.

Na quantificação por LC-MS/MS, as concentrações de glyphosate e AMPA variaram de 0 a 1,39 ng mL⁻¹ e de 0 a 0,09 ng mL⁻¹, respectivamente. No entanto, ao normalizar as concentrações em função dos volumes da solução extratora e da quantidade de massa seca utilizada nas amostras (ug g MS⁻¹), os teores não responderam uniformemente aos tratamentos testados, inviabilizando as análises estatísticas.

Para avaliação dos teores dos compostos da rota do ácido chiquímico foram realizadas análises conjuntas dos experimentos da primeira e segunda época de cultivo, que indicaram diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre as doses de glyphosate para fenilalanina, tirosina e triptofano. As análises dos teores dos ácidos chiquímico e quínico também mostraram diferenças significativas entre as doses de glyphosate testadas (Tabela 10).

Na análise dos teores dos aminoácidos aromáticos, os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com aplicação de glyphosate mostraram diferenças entre eles, significativas ao nível de 5% de probabilidade, indicando que a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ aumentou os teores de fenilalanina, tirosina e triptofano em relação à testemunha. Mesmo a dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ apresentando valores próximos à testemunha, estes não diferiram significativamente.

Para os ácidos fenólicos, os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com aplicação de glyphosate mostraram diferenças entre eles. Teores significativamente

inferiores ($p \leq 0,05$) de ácido chiquímico foram observados a partir da dose de 22,5 g e.a. ha^{-1} em relação à testemunha. Enquanto a aplicação da dose de 22,5 g e.a. ha^{-1} reduziu significativamente ($p \leq 0,05$) os teores de ácido quínico, em relação à testemunha e à maior dose testada (45 g e.a. ha^{-1}).

A análise conjunta dos experimentos sobre o acúmulo dos compostos da rota do ácido chiquímico indicou diferenças significativas entre as doses de glyphosate testadas ao nível de 5% de probabilidade para fenilalanina, tirosina, triptofano e ácidos chiquímico e quínico (Tabela 11).

Os contrastes entre as plantas da testemunha e as tratadas com glyphosate foram significativos ($p \leq 0,05$), e quando as concentrações dos compostos foram corrigidas em função da massa seca das plantas de cada unidade experimental, ocorreu redução no acúmulo de todos a partir da dose de 22,5 g e.a. ha^{-1} , com os maiores valores verificado na dose de 45 g e.a. ha^{-1} . Esse resultado indica que o baixo acúmulo nos tratamentos com o herbicida pode ser relacionado à dosagem do produto.

Tabela 10 – Médias dos teores dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos em plantas de *Urochloa decumbens* aos 15 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Fenilalanina (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Tirosina (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Triptofano (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	46,95	-	1	100,65	-	1	38,25	-	1
22,5	49,59	1,18	0,282	101,81	0,03	0,859	41,78	2,50	0,119
45	56,76	16,27	<0,001	155,97	72,11	<0,001	58,03	78,88	<0,001
F Doses		8,71	<0,001		47,08	<0,001		44,89	<0,001
F Época		65,59	<0,001		7,18	0,010		<0,001	0,982
DMS (t p≤0,05)	4,87			13,05			4,46		
CV (%)	15,04			17,24			15,30		
Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Ácido chiquímico (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Ácido quínico (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p			
0	89,52	-	1	77,43	-	1			
22,5	50,84	26,27	<0,001	57,41	5,46	0,023			
45	54,51	21,52	<0,001	86,06	1,01	0,318			
F Doses		16,01	<0,001		5,88	0,004			
F Época		15,54	<0,001		0,41	0,526			
DMS (t p≤0,05)	15,12			17,17					
CV (%)	36,74			36,80					

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 11 – Médias dos acúmulos dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos em plantas de *Urochloa decumbens* aos 15 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Fenilalanina (ug MS)	F	Valor p	Tirosina (ug MS)	F	Valor p	Triptofano (ug MS)	F	Valor p
0	675,45	-	1	1453,13	-	1	557,08	-	1
22,5	422,84	41,50	<0,001	858,80	72,07	<0,001	342,43	83,37	<0,001
45	218,60	135,73	<0,001	577,82	156,32	<0,001	214,13	212,82	<0,001
F Doses		68,12	<0,001		81,50	<0,001		108,66	<0,001
F Época		36,64	<0,001		27,99	0,009		10,88	0,002
DMS (t p≤0,05)	78,56			140,25			47,09		
CV (%)	28,25			22,98			20,03		
Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Ácido chiquímico (ug MS)	F	Valor p	Ácido quínico (ug MS)	F	Valor p			
0	1385,13	-	1	1148,91	-	1			
22,5	462,32	54,13	<0,001	522,63	49,31	<0,001			
45	191,93	90,50	<0,001	308,31	88,84	<0,001			
F Doses		49,76	<0,001		47,98	<0,001			
F Época		10,21	<0,001		1,01	0,319			
DMS (t p≤0,05)	251,26			178,65					
CV (%)	58,35			42,73					

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Nas Tabelas 12 e 13 estão apresentados os valores referentes aos teores e acúmulos dos aminoácidos fenilalanina, tirosina e triptofano e dos ácidos chiquímico e quínico encontrados nas plantas de *U. decumbens* aos 30 DAA, respectivamente. Na quantificação dos compostos por LC-MS/MS, o glyphosate e AMPA não foram detectados nas amostras coletadas.

A análise conjunta dos experimentos sobre os teores dos aminoácidos aromáticos indicou diferenças, sendo significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses somente para tirosina. Com relação aos teores dos ácidos fenólicos, diferenças significativas foram observadas entre as doses de glyphosate para os ácidos chiquímico e quínico (Tabela 12).

Os contrastes entre os tratamentos com aplicação de glyphosate e a testemunha foram significativos ($p \leq 0,05$), mostrando que os teores de tirosina aumentaram com o incremento das doses de glyphosate. O seu teor foi numericamente maior na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ em relação à testemunha.

Para os ácidos fenólicos, os contrastes entre os tratamentos com aplicação do herbicida e a testemunha também foram significativos ao nível de 5% de probabilidade, indicando que os teores dos ácidos chiquímico e quínico reduziram com o aumento das doses de glyphosate, sendo as maiores reduções encontradas na dose de 45 g e.a. ha⁻¹.

Com relação à análise do acúmulo dos compostos, diferenças significativas foram observadas entre as doses de glyphosate testadas tanto para os aminoácidos aromáticos como para os ácidos fenólicos (Tabela 13).

Os contrastes entre as plantas não tratadas e as que receberam a aplicação de glyphosate foram significativos ao nível de 5% de probabilidade. Quando as concentrações foram corrigidas em função da massa seca das plantas em cada unidade experimental, ocorreram reduções nos acúmulos de todos os compostos, sendo observadas reduções a partir da dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹, tanto para os aminoácidos fenilalanina, tirosina e triptofano como para os ácidos chiquímico e quínico. Esse resultado indica que o baixo acúmulo nos tratamentos com o herbicida pode ser relacionado à dose do produto.

Tabela 12 – Médias dos teores dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos em plantas de *Urochloa decumbens* aos 30 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Fenilalanina (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Tirosina (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Triptofano (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	31,95	-	1	51,26	-	1	31,30	-	1
22,5	32,07	0,003	0,960	53,69	0,22	0,642	31,65	0,01	0,902
45	35,22	1,70	0,204	64,57	6,61	0,016	28,68	0,89	0,354
F Doses		1,09	0,349		3,75	0,036		0,68	0,514
F Época		59,88	<0,001		0,01	0,917		0,004	0,947
DMS (t p≤0,05)	5,16			10,64			5,72		
CV (%)	16,97			20,47			20,38		
Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Ácido chiquímico (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Ácido quínico (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p			
0	204,64	-	1	223,45	-	1			
22,5	171,15	9,09	0,006	179,40	4,27	0,049			
45	154,98	20,00	<0,001	165,89	7,29	0,012			
F Doses		10,40	<0,001		3,99	0,029			
F Época		3,53	0,070		7,12	0,012			
DMS (t p≤0,05)	22,83			43,79					
CV (%)	14,04			25,13					

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 13 – Médias dos acúmulos dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos em plantas de *Urochloa decumbens* aos 30 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Fenilalanina (ug MS)	F	Valor p	Tirosina (ug MS)	F	Valor p	Triptofano (ug MS)	F	Valor p
0	1307,37	-	1	2207,77	-	1	1369,11	-	1
22,5	995,62	17,29	<0,001	1760,00	8,50	0,007	1047,42	8,80	0,006
45	790,71	47,49	<0,001	1510,91	20,58	<0,001	665,92	42,05	<0,001
F Doses		24,08	<0,001		10,57	<0,001		21,07	<0,001
F Época		1,76	0,195		35,37	<0,001		23,44	<0,001
DMS (t p≤0,05)	154,11			315,70			222,90		
CV (%)	16,26			18,81			23,60		
Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Ácido chiquímico (ug MS)	F	Valor p	Ácido quínico (ug MS)	F	Valor p			
0	9054,46	-	1	10144,90	-	1			
22,5	5911,04	23,89	<0,001	6379,85	14,69	0,001			
45	3629,47	71,17	<0,001	3847,69	41,10	<0,001			
F Doses		35,88	<0,001		20,81	<0,001			
F Época		37,55	<0,001		32,73	<0,001			
DMS (t p≤0,05)	1321,74			2018,95					
CV (%)	23,20			32,34					

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Os teores e acúmulos dos aminoácidos aromáticos e dos ácidos fenólicos encontrados na rebrota das plantas de *U. decumbens* estão apresentados nas Tabelas 14 e 15, respectivamente. Assim como na coleta anterior, na quantificação dos compostos por LC-MS/MS, o glyphosate e o AMPA não foram detectados nas amostras.

Quanto aos teores dos aminoácidos aromáticos, a análise conjunta dos experimentos mostrou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses somente para tirosina. Nos teores dos ácidos fenólicos, foram observadas diferenças significativas entre as doses de glyphosate para ambos os metabólitos (Tabela 14).

Os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com aplicação de glyphosate mostraram diferenças entre eles. Os teores de tirosina aumentaram com o incremento das doses, sendo o maior valor ($p \leq 0,05$) encontrado na dose de 45 g e.a. ha⁻¹, em relação às plantas da testemunha.

Para os ácidos fenólicos, os contrastes também foram significativos ao nível de 5% de probabilidade entre as tratamentos com glyphosate e a testemunha. Verificou-se redução nos teores de ácido chiquímico e ácido quínico com o aumento da doses, sendo os menores valores encontrados na dose de 45 g e.a. ha⁻¹, em relação às plantas da testemunha.

Quanto ao acúmulo dos compostos, a análise conjunta dos experimentos indicou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses para os três aminoácidos aromáticos e para os ácidos chiquímico e quínico (Tabela 15).

Quando as concentrações dos compostos foram corrigidas em função da massa seca das plantas em cada unidade experimental, observou-se diferenças entre eles em resposta ao tratamento com glyphosate. Para fenilalanina e tirosina os contrastes entre a testemunha e a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ foram significativos ($p \leq 0,05$), sendo verificado aumento no acúmulo desses aminoácidos em relação à testemunha.

Para triptofano, ácido chiquímico e ácido quínico, os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com glyphosate indicaram diferenças, com reduções significativas ($p \leq 0,05$) nos acúmulos pela aplicação da dose 22,5 g e.a. ha⁻¹.

Tabela 14 – Médias dos teores dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos da rebrota de plantas de *Urochloa decumbens*, em função das doses do herbicida glyphosate

Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Fenilalanina (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Tirosina (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Triptofano (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	47,14	-	1	89,98	-	1	39,58	-	1
22,5	54,92	5,08	0,033	104,24	13,33	0,001	38,78	0,32	0,572
45	51,22	1,39	0,248	108,47	22,42	<0,001	36,66	4,36	0,047
F Doses		2,54	0,096		12,31	<0,001		2,32	0,115
F Época		69,57	<0,001		286,23	<0,001		93,80	<0,001
DMS (t p≤0,05)	7,09			8,03			2,87		
CV (%)	15,11			8,66			8,15		
Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Ácido chiquímico (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p	Ácido quínico (ug g MS ⁻¹)	F	Valor p			
0	86,36	-	1	120,25	-	1			
22,5	52,24	20,02	<0,001	80,65	16,45	<0,001			
45	49,03	23,97	<0,001	68,09	28,55	<0,001			
F Doses		14,72	<0,001		15,55	<0,001			
F Época		141,95	<0,001		46,43	<0,001			
DMS (t p≤0,05)	15,67				20,06				
CV (%)	27,26				24,34				

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 15 – Médias dos acúmulos dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos da rebrota de plantas de *Urochloa decumbens*, em função das doses do herbicida glyphosate

Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Fenilalanina (ug MS)	F	Valor p	Tirosina (ug MS)	F	Valor p	Triptofano (ug MS)	F	Valor p
0	82,24	-	1	165,80	-	1	84,47	-	1
22,5	61,60	1,46	0,238	114,41	3,91	0,058	45,04	18,44	<0,001
45	135,54	9,74	0,004	249,37	10,36	0,003	91,00	0,50	0,483
F Doses		9,98	0,001		13,77	<0,001		14,66	<0,001
F Época		51,14	<0,001		72,34	<0,001		136,34	<0,001
DMS (t p≤0,05)	35,11			53,35			18,88		
CV (%)	41,01			32,88			27,94		
Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Ácido chiquímico (ug MS)	F	Valor p	Ácido quínico (ug MS)	F	Valor p			
0	256,34	-	1	295,08	-	1			
22,5	94,45	15,47	0,001	128,24	20,73	<0,001			
45	228,62	0,45	0,506	273,16	0,35	0,555			
F Doses		8,85	0,001		12,24	<0,001			
F Época		107,02	<0,001		155,36	<0,001			
DMS (t p≤0,05)	84,60			75,32					
CV (%)	47,65			35,29					

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Para melhor visualização dos resultados, os gráficos referentes aos teores de fenilalanina, tirosina, triptofano e ácidos chiquímico e quínico aos 15 DAA, 30 DAA e na rebrota estão apresentados na Figura 11.

A inibição da enzima EPSPs pela ação do glyphosate afeta a rota metabólica do ácido chiquímico, bloqueando a biossíntese dos aminoácidos aromáticos e dos fenóis derivados desses aminoácidos (DEVINE et al., 1993). Geralmente o comportamento esperado por esses aminoácidos após a aplicação do herbicida são reduções em seus teores. No entanto, analisando os teores aos 15 DAA, o que ocorreu nesse estudo foram aumentos de aproximadamente 21% e 55% de fenilalanina e tirosina nos tecidos foliares, respectivamente, quando as plantas foram submetidas à aplicação de 45 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate (Figura 11).

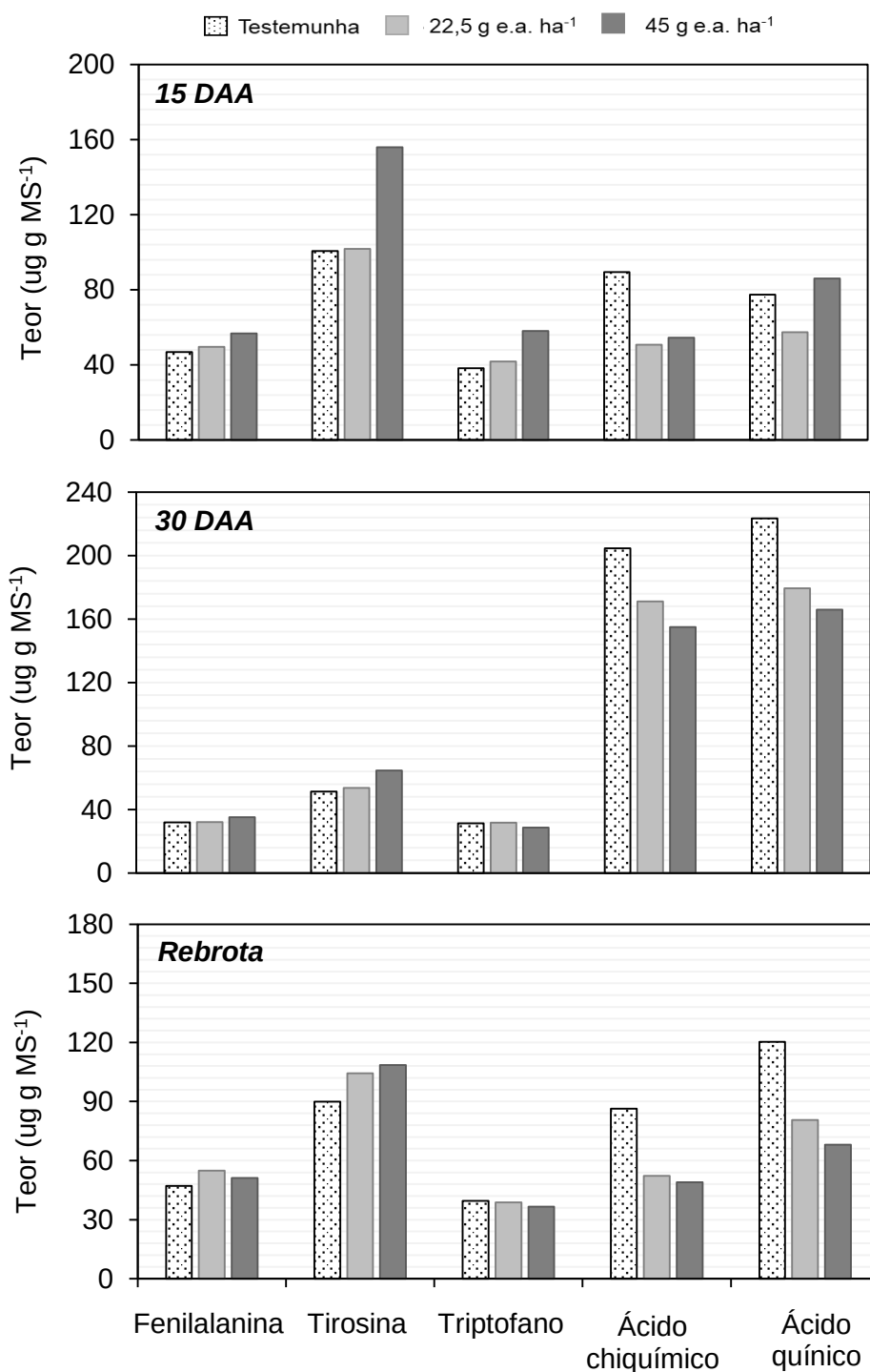
Estudos realizados por Petersen et al. (2007) com *Brassica napus* L. mostraram aumento significativo nos teores dos aminoácidos, sendo mais pronunciado para fenilalanina, em comparação com a testemunha. Com isso, mesmo na menor concentração de glyphosate (1 uM), os teores dos aminoácidos foram afetados.

O acréscimo nos teores de aminoácidos aromáticos, especialmente de fenilalanina em exposição às baixas doses de glyphosate foi relatado em plantas de *Apera spica-venti* em resposta à aplicação foliar do herbicida (RAVN et al., 2005). Resultado semelhante foi obtido por Wang et al. (2001), com aumento na concentração de tirosina em tubérculos de *Cyperus rotundus* tratados em solução com glyphosate aos 7 dias após o tratamento, quando comparados aos tubérculos não tratados.

Aos 30 DAA as plantas de *U. decumbens* tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ apresentaram acréscimo de 26% no teor de tirosina. De modo geral, houve queda nos teores dos aminoácidos aromáticos em relação à coleta realizada aos 15 DAA. Além disso, os teores dos aminoácidos encontrados na rebrota das plantas mostraram-se similares às coletas anteriores, os quais nas doses de glyphosate, foram maiores do que nas plantas não tratadas com o herbicida.

Plantas de soja convencional, sensíveis ao glyphosate, apresentaram resposta positiva para esses aminoácidos, com aumento nas menores doses do herbicida em relação ao controle, e redução na dose mais alta, de 720 g e.a. ha⁻¹ (SILVA et al., 2015).

Figura 11 – Teores de fenilalanina, tirosina, triptofano, ácido chiquímico e ácido quínico em plantas de *Urochloa decumbens* em função dos períodos de coleta



Fenilalanina e tirosina são aminoácidos importantes pois participam da biossíntese de proteínas, além de serem substratos utilizados na via de fenilpropanoides, que produz diversos compostos secundários, tais como

antocianinas, lignina, promotores e inibidores de crescimento e compostos fenólicos envolvidos na defesa das plantas (YAMADA; CASTRO, 2007).

O triptofano é precursor importante do ácido indolacético (AIA), hormônio vegetal responsável pela expansão celular, manutenção da dominância apical, crescimento de caules e raízes e outros processos regulatórios (DEVINE et al., 1993; VELINI et al., 2009). Assim como os outros aminoácidos aromáticos, o comportamento esperado para o triptofano seria de redução no teor, porém foi observada uma tendência de aumento aos 15 DAA nas plantas tratadas com glyphosate, com acréscimo aproximado de 52% na maior dose (45 g e.a. ha⁻¹).

Wang et al. (2001) investigaram o efeito do glyphosate no teor de aminoácidos aromáticos em plântulas de *Cyperus rotundus* e observaram que a concentração de triptofano foi maior aos 3 dias após o tratamento, quando comparada com a testemunha. Assim como Gomes (2011), que observou aumento de até 13% nos teores de triptofano em folhas de plantas de milho aos 2 DAA de glyphosate em associação com fosfito, no entanto o maior teor foi encontrado aos 15 DAA na menor dose (72 g e.a. ha⁻¹), sendo superior à testemunha.

Ao passo que na coleta da parte aérea de plantas de *U. decumbens* aos 30 DAA e na rebrota, os teores de triptofano analisados não variaram em função da aplicação das baixas doses de glyphosate.

A tendência em reduzir os níveis dos aminoácidos aromáticos está de acordo com o mecanismo de ação do glyphosate. Alguns autores sugerem que o triptofano é o aminoácido aromático menos sensível à inibição pelo glyphosate, em parte, devido às diferenças nas afinidades das enzimas pelo corismato (AMRHEIN et al., 1980).

Uma das possíveis explicações para o aumento dos teores dos aminoácidos aromáticos seria de que esse aumento é causado principalmente pelo acelerado catabolismo de proteínas e redução na fonte de utilização dos aminoácidos para a síntese proteica (MAROLI et al., 2016).

No entanto, nem sempre ocorre a redução no teor de aminoácidos. Segundo Velini et al. (2009), esse fato pode ser devido à presença de sistemas controladores da rota, que podem compensar, pelo menos em parte, a menor síntese de alguns dos compostos intermediários. Portanto, torna-se difícil prever se os produtos distantes do sítio de ação do glyphosate (EPSPs), terão sua síntese bloqueada ou reduzida consideravelmente após aplicação.

No presente estudo não houve aumento nos teores de ácido chiquímico pela aplicação de glyphosate, o que normalmente seria esperado quando esse herbicida está atuando (SINGH; SHANER, 1998). Pelo contrário, as plantas de *U. decumbens* que receberam a aplicação de glyphosate apresentaram reduções significativas nos teores quando comparadas com as plantas da testemunha nos três períodos avaliados. Aos 15 DAA, as plantas tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ apresentaram maior teor de ácido chiquímico em relação à dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹, porém esse teor foi inferior à testemunha.

Alguns trabalhos indicam que o ácido chiquímico acumula rapidamente nas plantas sensíveis após aplicação de glyphosate. Resultados obtidos por Gravena et al. (2009) em folhas jovens e maduras de mudas de limão cravo mostraram altas concentrações do ácido logo aos 2 DAA, porém com o decorrer do tempo houve redução nos teores, indicando o efeito transitório do herbicida. Aumentos de ácido chiquímico aos 7 DAA de glyphosate foram detectados em plantas de laranja pera, apresentando tendência de queda a partir do 15º dia (MATALLO et al., 2010).

Diversos autores demonstraram que os teores de ácido chiquímico após a aplicação de glyphosate podem mudar com o tempo, como observado em folhas jovens de *Abutilon theophrasti* (BECERRIL et al., 1989) e em grãos de trigo (BRESNAHAN et al., 2003). Em experimentos com *U. decumbens*, Matallo et al. (2006) verificaram queda nos teores de ácido chiquímico ao longo do tempo, sendo os teores médios encontrados nas plantas inferiores à testemunha na maior concentração de glyphosate (0,033 mM).

A maioria dos estudos mostra que o acúmulo de chiquimato está diretamente relacionado com o dano causado na planta, podendo o seu teor ser utilizado para diagnosticar a intoxicação das plantas sensíveis ao glyphosate (SINGH; SHANER, 1998). No entanto, a diferença de sensibilidade entre plantas pode ocorrer em função da afinidade da enzima EPSPs com o herbicida, variando de acordo com a espécie (FEDTKE; DUKE, 2004).

Considerando a estreita relação entre o acúmulo desse composto e o dano por glyphosate, como a planta permaneceu viva mesmo após a aplicação, é provável que a transformação de chiquimato em corismato tenha sido reduzida, mas não completamente paralisada, resultando em menor acúmulo de ácido chiquímico. Portanto, diferenças observadas nos teores desse metabólito justificam um estudo mais aprofundado do efeito das baixas doses de glyphosate nessa espécie.

O comportamento do ácido quínico nas plantas de *U. decumbens* foi semelhante ao do ácido chiquímico. Os teores alteraram após a aplicação das doses de glyphosate em todos os períodos avaliados, com redução nos teores quando comparados à testemunha. Gomes (2011) relatou que folhas de milho submetidas à aplicação de glyphosate também apresentaram baixos teores de ácido quínico em relação à testemunha aos 10 e 15 dias após os tratamentos. No entanto, no presente estudo observou-se maior redução no teor de ácido quínico nas plantas que foram tratadas com 22,5 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate aos 15 DAA e na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ aos 30 DAA e na rebrota.

Os acúmulos de fenilalanina, tirosina, triptofano e ácidos chiquímico e quínico analisados nas plantas de *U. decumbens* e corrigidos em função da massa seca das plantas aos 15 DAA, 30 DAA e durante a rebrota estão apresentados na Figura 12.

Na coleta de parte aérea realizada aos 15 DAA, os acúmulos de todos os compostos foram menores quando as plantas foram tratadas com glyphosate. Para a maior dose testada, de 45 g e.a. ha⁻¹, foram verificados os menores acúmulos, sendo inferiores à testemunha aproximadamente, 3 vezes para fenilalanina, 2,5 vezes para tirosina e 2,6 vezes para triptofano. Para os ácidos chiquímico e quínico as reduções foram da ordem de 7 e 3,8 vezes, respectivamente, em relação à testemunha.

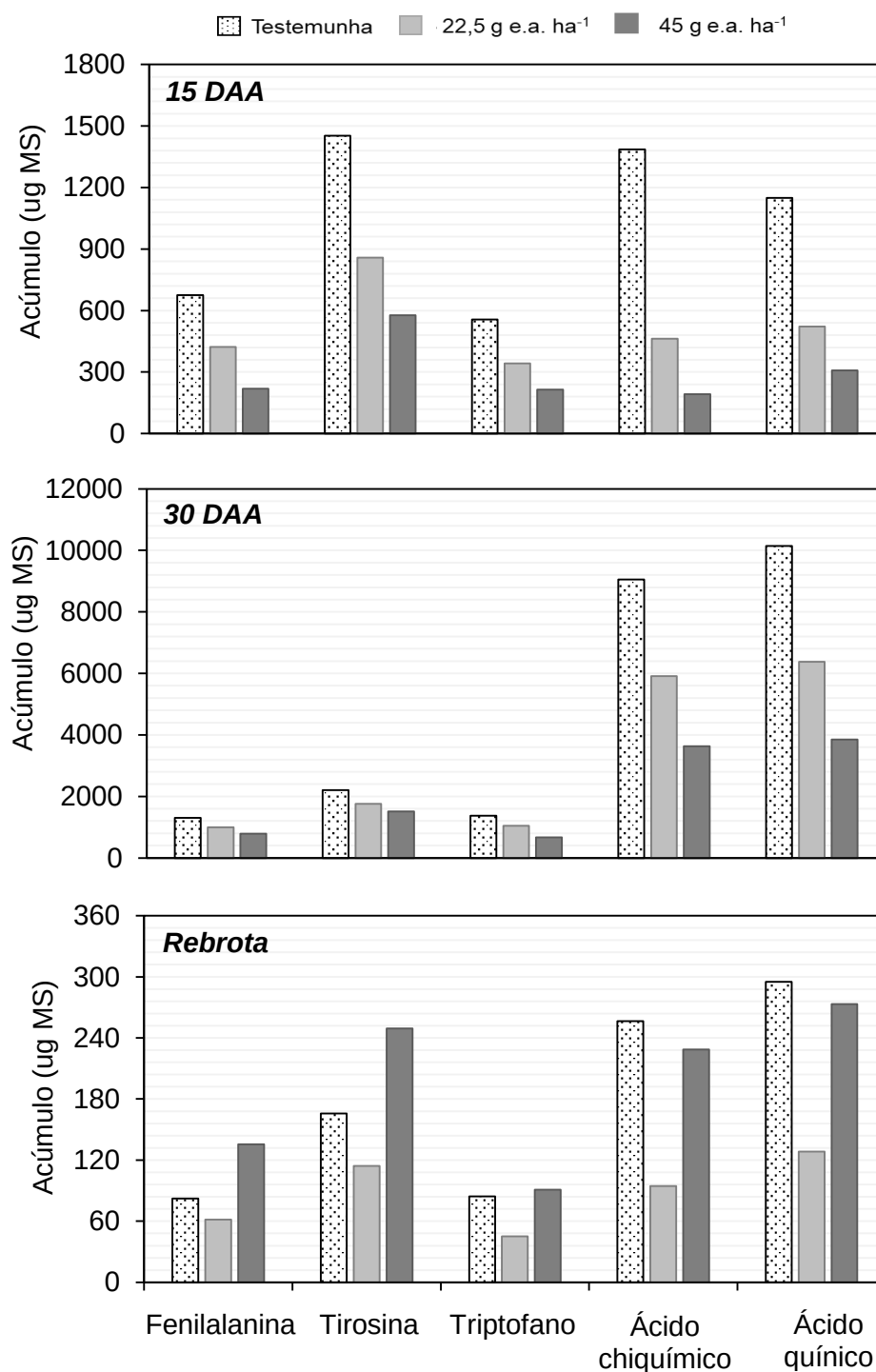
Do mesmo modo, na coleta realizada aos 30 DAA, os acúmulos dos compostos reduziram de maneira significativa nas plantas tratadas com glyphosate, quando comparadas com as que não receberam a aplicação. As reduções mais expressivas no acúmulo ocorreram para os ácidos chiquímico e quínico na maior dose, de aproximadamente 2,5 e 2,6 vezes em relação à testemunha.

No entanto, na coleta da rebrota das plantas, os acúmulos variaram, como é o caso dos aminoácidos aromáticos. Foram verificados maiores acúmulos de fenilalanina e tirosina nas plantas tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹, sendo superiores à testemunha, enquanto para triptofano o acúmulo reduziu na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹.

Vale ressaltar que as doses de glyphosate que anteriormente reduziram o acúmulo dos compostos nas coletas realizadas aos 15 e 30 DAA, na rebrota das plantas após o corte, acabaram por destacarem-se positivamente em relação à testemunha. A dose de 45 g e.a. ha⁻¹, por exemplo, apresentou menores acúmulos nas coletas anteriores, enquanto na rebrota promoveu aumento, principalmente de fenilalanina e tirosina. No entanto, para os ácidos chiquímico e quínico, decréscimos

no acúmulo foram verificados na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ em comparação com a testemunha.

Figura 12 – Acúmulo de fenilalanina, tirosina, triptofano, ácido chiquímico e ácido quínico em plantas de *Urochloa decumbens* em função dos períodos de coleta



4.3 Avaliação de absorção e disponibilidade de macronutrientes

Os valores referentes aos teores e acúmulos de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e enxofre (S) encontrados nas plantas de *U. decumbens* aos 15 DAA de glyphosate estão apresentados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente.

Para avaliação dos teores dos macronutrientes, foram realizadas análises conjuntas dos experimentos da primeira e segunda época de cultivo, que indicaram diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses de glyphosate testadas para N, P, K, Ca, Mg e S (Tabela 16).

Os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com aplicação de glyphosate foram significativos ao nível de 5% de probabilidade. Teores superiores de N, P, Mg e S foram observados a partir da dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ em relação à testemunha, com os maiores valores verificados na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Para o teor de Ca somente a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ promoveu aumento superior à testemunha ($p \leq 0,05$). No entanto, essa mesma dose causou redução significativa ($p \leq 0,05$) no teor de K em comparação com as plantas da testemunha.

A análise conjunta dos experimentos referente ao acúmulo dos nutrientes indicou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses testadas para todos os macronutrientes (Tabela 17).

Os contrastes entre as plantas não tratadas e as tratadas com glyphosate foram significativos ao nível de 5% de probabilidade. Quando as concentrações dos macronutrientes foram corrigidas em função da massa seca das plantas em cada unidade experimental, acúmulos inferiores à testemunha foram observados em todos os nutrientes a partir da dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹, sendo os menores valores verificados na maior dose (45 g e.a. ha⁻¹). Isso indica que o baixo acúmulo dos nutrientes nas plantas que receberam a aplicação do herbicida pode ser relacionado à dose do produto.

Tabela 16 - Médias dos teores de macronutrientes em plantas de *Urochloa decumbens* aos 15 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Fósforo (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Potássio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	19,58	-	1	5,55	-	1	54,32	-	1
22,5	24,90	15,50	<0,001	6,23	11,83	0,001	56,13	0,74	0,393
45	30,49	65,10	<0,001	6,91	47,67	<0,001	46,55	13,69	<0,001
F Doses		32,56	<0,001		23,84	<0,001		11,75	<0,001
F Época		0,94	0,336		30,99	<0,001		1,89	0,174
DMS (t p≤0,05)	2,71			0,39			4,21		
CV (%)	17,11			9,97			12,69		
Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Magnésio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Enxofre (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	1,73	-	1	3,66	-	1	5,46	-	1
22,5	1,78	0,15	0,700	4,30	7,88	0,007	7,65	22,72	<0,001
45	2,07	8,15	0,006	5,79	87,65	<0,001	7,73	24,37	<0,001
F Doses		4,80	0,012		46,17	<0,001		15,71	<0,001
F Época		100,79	<0,001		48,55	<0,001		21,86	<0,001
DMS (t p≤0,05)	0,24			0,46			0,92		
CV (%)	20,19			15,75			20,90		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 17 - Médias dos acúmulos de macronutrientes em plantas de *Urochloa decumbens* aos 15 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg MS)	F	Valor p	Fósforo (mg MS)	F	Valor p	Potássio (mg MS)	F	Valor p
0	292,70	-	1	81,85	-	1	801,49	-	1
22,5	199,27	29,63	<0,001	51,05	69,62	<0,001	463,87	79,27	<0,001
45	118,42	103,13	<0,001	27,16	219,55	<0,001	178,16	270,21	<0,001
F Doses		51,65	<0,001		110,36	<0,001		135,42	<0,001
F Época		0,20	0,657		7,48	0,008		1,44	0,234
DMS (t p≤0,05)	34,38			7,39			75,96		
CV (%)	26,67			21,88			24,92		
Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg MS)	F	Valor p	Magnésio (mg MS)	F	Valor p	Enxofre (mg MS)	F	Valor p
0	26,71	-	1	52,57	-	1	82,35	-	1
22,5	14,06	36,07	<0,001	35,58	47,21	<0,001	60,57	12,96	0,001
45	7,45	83,67	<0,001	22,32	149,79	<0,001	29,76	75,58	<0,001
F Doses		43,20	<0,001		75,28	<0,001		38,17	<0,001
F Época		21,49	<0,001		58,93	<0,001		11,61	0,001
DMS (t p≤0,05)	4,22			4,95			12,12		
CV (%)	41,42			21,22			33,23		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Nas Tabelas 18 e 19 estão apresentados os valores referentes aos teores e acúmulos dos macronutrientes analisados nas plantas de *U. decumbens* aos 30 DAA. A análise conjunta dos experimentos indicou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses para N, P, K e S, sendo os contrastes entre os tratamentos com aplicação do herbicida e a testemunha também significativos ($p \leq 0,05$) (Tabela 18).

Os teores desses nutrientes aumentaram com o incremento das doses de glyphosate. Teores superiores à testemunha de N, P e K foram encontrados a partir da dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹, com os maiores valores verificados na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Para S, somente a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ promoveu aumento no teor.

Com relação à análise do acúmulo dos macronutrientes, diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade foram encontradas entre as doses de glyphosate testadas para N, P, K, Ca e Mg (Tabela 19).

Os contrastes entre as plantas não tratadas e as que receberam a aplicação da dose de 45 g e.a. ha⁻¹ foram significativos ($p \leq 0,05$) para N, P e K. Quando as concentrações desses macronutrientes foram corrigidas em função da massa seca das plantas em cada unidade experimental, ocorreram reduções no acúmulo.

Para Ca e Mg, os contrastes entre as doses testadas e a testemunha também foram significativos ($p \leq 0,05$), porém as reduções nos acúmulos ocorreram a partir da aplicação de 22,5 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, com os maiores valores verificados na dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Nesse caso, o baixo acúmulo dos macronutrientes nos tratamentos com o glyphosate pode ser relacionado à dose do produto.

Tabela 18 - Médias dos teores de macronutrientes em plantas de *Urochloa decumbens* aos 30 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Fósforo (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Potássio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	8,08	-	1	2,96	-	1	29,40	-	1
22,5	10,27	5,96	0,022	3,67	17,65	<0,001	37,50	6,68	0,016
45	11,88	18,06	<0,001	4,22	55,43	<0,001	38,48	8,39	0,008
F Doses		9,10	0,001		27,87	<0,001		5,06	0,013
F Época		130,71	<0,001		49,87	<0,001		0,05	0,822
DMS (t p≤0,05)	1,84			0,35			6,44		
CV (%)	19,83			10,42			19,96		
Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Magnésio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Enxofre (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	1,17	-	1	3,77	-	1	1,64	-	1
22,5	1,11	0,13	0,714	3,69	0,05	0,817	2,30	3,73	0,064
45	1,43	2,19	0,151	3,89	0,15	0,693	3,60	33,26	<0,001
F Doses		1,92	0,165		0,20	0,816		17,23	<0,001
F Época		13,16	0,001		109,60	<0,001		1,33	0,258
DMS (t p≤0,05)	0,35			0,63			0,70		
CV (%)	30,81			18,19			30,12		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 19 - Médias dos acúmulos de macronutrientes em plantas de *Urochloa decumbens* aos 30 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg MS)	F	Valor p	Fósforo (mg MS)	F	Valor p	Potássio (mg MS)	F	Valor p
0	319,76	-	1	126,90	-	1	1287,67	-	1
22,5	315,58	0,02	0,888	119,28	0,83	0,370	1229,29	0,30	0,584
45	251,80	5,35	0,029	96,03	13,66	0,001	920,12	12,15	0,002
F Doses		3,36	0,049		7,42	0,003		7,02	0,003
F Época		32,02	<0,001		7,82	0,009		32,15	<0,001
DMS (t p≤0,05)	60,36			17,16			216,68		
CV (%)	22,21			16,37			20,57		
Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg MS)	F	Valor p	Magnésio (mg MS)	F	Valor p	Enxofre (mg MS)	F	Valor p
0	54,60	-	1	149,37	-	1	71,35	-	1
22,5	38,18	7,08	0,013	114,89	13,76	0,001	73,21	0,02	0,866
45	33,92	11,25	0,002	85,19	47,71	<0,001	85,17	1,59	0,218
F Doses		6,27	0,005		23,90	<0,001		0,94	0,403
F Época		50,14	<0,001		23,58	<0,001		4,44	0,044
DMS (t p≤0,05)	12,67			19,10			22,50		
CV (%)	32,65			17,84			31,96		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Os valores referentes aos teores e acúmulos dos macronutrientes analisados na rebrota das plantas de *U. decumbens* estão apresentados nas Tabelas 20 e 21, respectivamente. Nos resultados obtidos quanto aos teores, a análise conjunta dos experimentos mostrou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses de glyphosate para N, K e S (Tabela 20).

Os contrastes entre os tratamentos com aplicação de glyphosate e a testemunha foram significativos ($p \leq 0,05$). As plantas que receberam a aplicação de 22,5 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate apresentaram teores de N e K superiores à testemunha. Enquanto os teores de S encontrados nas plantas tratadas com o herbicida foram numericamente superiores às plantas da testemunha, com o maior valor observado na dose de 45 g e.a. ha⁻¹.

Em relação ao acúmulo dos macronutrientes, a análise mostrou diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses testadas para todos os nutrientes estudados (Tabela 21).

Para P, Ca e Mg os contrastes entre a testemunha e a dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ foram significativos ($p \leq 0,05$) e quando suas concentrações foram corrigidas em função da massa seca das plantas em cada unidade experimental, houve redução no acúmulo desses nutrientes.

Para K e S os contrastes entre a testemunha e as doses testadas também foram significativos ($p \leq 0,05$), indicando que as plantas tratadas com 45 g e.a. ha⁻¹ apresentaram aumentos nos acúmulos em relação às plantas não tratadas. Aumento significativo ($p \leq 0,07$) no acúmulo de N também foi observado em plantas que receberam a aplicação da maior dose de glyphosate em relação à testemunha.

Tabela 20 - Médias dos teores dos macronutrientes da rebrota das plantas de *Urochloa decumbens*, em função das doses do herbicida glyphosate

Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Fósforo (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Potássio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	22,73	-	1	6,30	-	1	46,07	-	1
22,5	27,35	10,34	0,003	6,66	3,24	0,083	54,78	9,54	0,005
45	24,48	1,49	0,232	6,15	0,57	0,454	51,08	3,16	0,087
F Doses		5,27	0,011		3,46	0,045		4,81	0,016
F Época		56,84	<0,001		311,94	<0,001		25,09	<0,001
DMS (t p≤0,05)	2,95			0,41			5,80		
CV (%)	12,92			6,97			12,45		
Teor									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Magnésio (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p	Enxofre (mg g MS ⁻¹)	F	Valor p
0	2,36	-	1	4,60	-	1	3,81	-	1
22,5	2,28	0,10	0,746	4,44	0,38	0,542	7,40	24,73	<0,001
45	1,99	2,32	0,139	4,17	2,58	0,120	7,11	20,97	<0,001
F Doses		1,29	0,291		1,32	0,284		15,29	<0,001
F Época		12,08	0,002		189,34	<0,001		2,27	0,143
DMS (t p≤0,05)	0,49			0,55			1,48		
CV (%)	24,23			13,51			26,37		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 21 - Médias dos acúmulos dos macronutrientes da rebrota das plantas de *Urochloa decumbens*, em função das doses do herbicida glyphosate

Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg MS)	F	Valor p	Fósforo (mg MS)	F	Valor p	Potássio (mg MS)	F	Valor p
0	45,09	-	1	12,62	-	1	95,89	-	1
22,5	33,43	2,39	0,134	7,67	13,56	0,001	69,38	2,73	0,110
45	59,50	3,66	0,067	13,75	0,71	0,404	134,17	5,70	0,025
F Doses		6,01	0,007		11,61	<0,001		8,26	0,001
F Época		72,48	<0,001		122,09	<0,001		87,33	<0,001
DMS (t p≤0,05)	15,48			2,76			32,95		
CV (%)	36,61			26,47			35,92		
Acúmulo									
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg MS)	F	Valor p	Magnésio (mg MS)	F	Valor p	Enxofre (mg MS)	F	Valor p
0	4,71	-	1	7,69	-	1	6,69	-	1
22,5	2,68	7,65	0,010	4,95	6,46	0,017	11,58	2,02	0,167
45	5,22	0,47	0,498	8,99	1,46	0,238	22,38	20,81	<0,001
F Doses		6,69	0,004		7,33	0,003		10,90	<0,001
F Época		63,29	<0,001		46,30	<0,001		47,12	<0,001
DMS (t p≤0,05)	1,51			2,22			7,07		
CV (%)	39,00			33,45			56,74		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Para melhor visualização dos resultados, os gráficos referentes aos teores de N, P, K, Ca, Mg e S aos 15 DAA, 30 DAA e na rebrota das plantas de *U. decumbens* estão apresentados na Figura 13. Nesse estudo, foi possível observar que os teores dos macronutrientes foram influenciados pelas doses de glyphosate aplicadas.

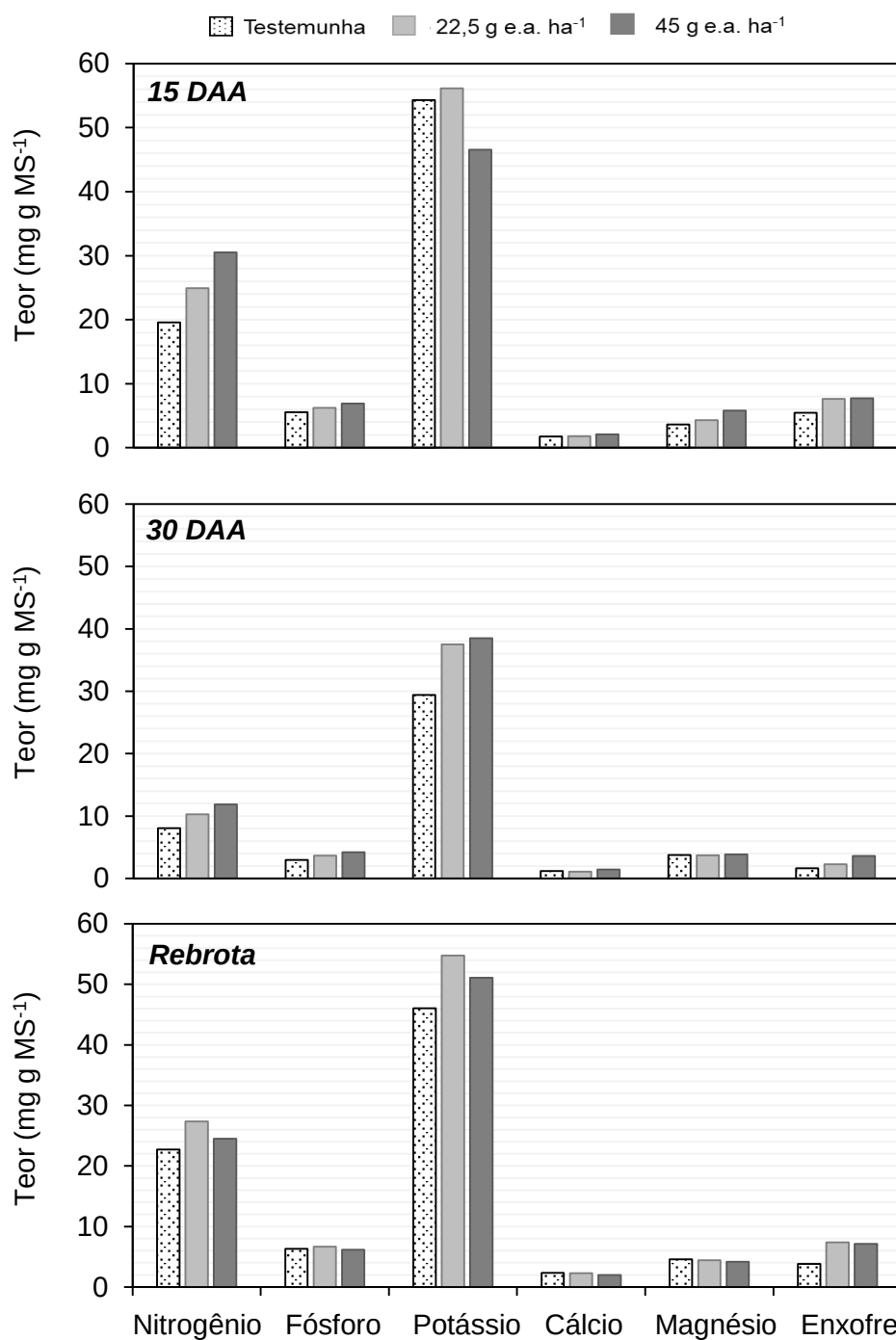
Verificou-se que a aplicação das doses de glyphosate aumentou os teores de N nas plantas nos três períodos avaliados. Foram observados aumentos de 56% e 47% na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ aos 15 e 30 DAA, respectivamente, sendo os teores de N aos 30 DAA menores em relação ao período de 15 DAA. Na rebrota, também verificou-se aumento no teor de N, contudo o acréscimo de 20% ocorreu na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹. O N é um elemento constituinte de moléculas de proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos, citocromos, amidas, nucleotídeos e hexosaminas (TAIZ et al., 2017).

Ferreira et al. (2008) encontraram aumentos no teor de N em biótipos de azevém (*Lolium multiflorum*) submetidos ao tratamento com o herbicida glyphosate em comparação com os biótipos não tratados. Ainda segundo Santos et al. (2007a), é possível observar efeito variável do glyphosate no teor nutricional de plantas em função de diferentes formulações, em que houve redução no teor de N nas folhas de soja resistentes a esse herbicida.

Uma provável explicação para o aumento nos teores de N verificados nesse estudo seria devido ao acúmulo nos vacúolos de células pelo bloqueio da rota do ácido chiquímico, que é um precursor parcial do nitrogênio absorvido pela planta (DA SILVA et al., 2016).

Os teores de P nas plantas de *U. decumbens* coletadas aos 15 e 30 DAA no presente estudo foram maiores quando tratadas com glyphosate, nas quais houve aumentos de 24,5% e 42,5%, respectivamente, após aplicação da dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Porém na rebrota das plantas, os teores desse nutriente não diferiram entre os tratamentos. Bortolheiro (2019) avaliando os teores de macronutrientes em feijão durante a safra de inverno, verificou aumento de até 20% no teor de P após a aplicação de 36 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Figura 13 – Teores de macronutrientes em plantas de *Urochloa decumbens* em função dos períodos de coleta



Em estudo com soja convencional em estágio inicial de crescimento e maturação dos grãos, Cakmak et al. (2009) observaram que as concentrações de P nas folhas jovens aumentaram significativamente com o incremento de doses de glyphosate. Enquanto Godoy (2007), ao avaliar o efeito do glyphosate na absorção de P em soja,

verificou que as doses entre 1,8 e 3,6 g e.a. ha⁻¹ aumentaram o teor total desse nutriente em soja convencional.

Tal fato, pode ser associado a um aumento na expressão de genes envolvidos na absorção de P, elevando assim, o seu teor na planta. O P é um importante nutriente com funções nos tecidos vegetais como componente de açúcares, fosfato, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, fosfolipídeos e ácido fítico, além de ter papel fundamental em reações que envolvem ATP (TAIZ et al., 2017).

Com relação aos teores de K nas plantas de *U. decumbens*, verificou-se aumento de 31% na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ aos 30 DAA, e aumento de 19% na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ na rebrota. Porém, nas plantas coletadas aos 15 DAA, o teor de K reduziu 14% quando foram tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ em comparação com a testemunha.

Alguns autores verificaram efeito contrário ao observado no presente trabalho, com reduções nos teores de K após aplicação de glyphosate em plantas de feijão comum (RABELLO et al., 2015; BORTOLHEIRO, 2019), café (FRANÇA et al., 2010) e biótipos suscetíveis de azevém (*Lolium multiflorum*) (FERREIRA et al., 2008). Por outro lado, outros autores não observaram efeito da aplicação de baixas doses de glyphosate sobre o teor de K (SANTOS et al., 2007a; SANTOS et al., 2007b; CAKMAK et al., 2009; PERIM et al., 2011).

O K pertence ao grupo dos nutrientes que são encontrados na forma iônica, sendo requerido como cofator de mais de 40 enzimas, colaborando na abertura e fechamento dos estômatos. Além disso, é o principal cátion no estabelecimento do turgor celular (TAIZ et al., 2017).

No presente estudo, na coleta realizada aos 15 DAA foram observados aumentos de 19,6% no teor de Ca e de 58% no teor de Mg nas plantas de *U. decumbens* após aplicação da dose de 45 g e.a. ha⁻¹. Porém não foi observado efeito significativo do herbicida sobre os teores desses nutrientes aos 30 DAA e na rebrota.

Bortolheiro (2019) avaliando o teor nutricional das folhas de feijão na safra de inverno, verificou aumentos de 19% e 21% nos teores de Ca nas doses de 7,2 e 36 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, respectivamente, e aumento de 19% no teor de Mg na dose 7,2 g e.a. ha⁻¹. Enquanto França et al. (2010) observaram aumentos nos teores de Ca em plantas de café arábica aos 45 DAA com o incremento das doses de glyphosate em simulação de deriva. Outros trabalhos também encontraram aumentos nos teores

de Ca e Mg após aplicação de glyphosate, como Santos et al. (2007b) com eucalipto e Santos et al. (2007a) com soja convencional.

No entanto, reduções nos teores de Ca e Mg pela aplicação de glyphosate foram encontradas em trabalhos com feijão na safra das águas (BORTOLHEIRO, 2019), feijão comum cultivar Pérola (RABELLO et al., 2015), soja convencional (CAKMAK et al., 2009), biótipos suscetíveis de azevém (*Lolium multiflorum*) (FERREIRA et al., 2008), e redução no teor de Ca em soja transgênica (SANTOS et al., 2007a; ZOBIOLE et al., 2012).

O Ca é um elemento integrante de paredes celulares e está relacionado com o alongamento, estabilização e permeabilidade seletiva das membranas celulares. Possui papel de sinalizador, atuando como mensageiro secundário na regulação metabólica (TAIZ et al., 2017). O Mg tem função importante na ativação de enzimas envolvidas na respiração, fotossíntese e na síntese de DNA e RNA, além de ser constituinte da clorofila (TAIZ et al., 2017).

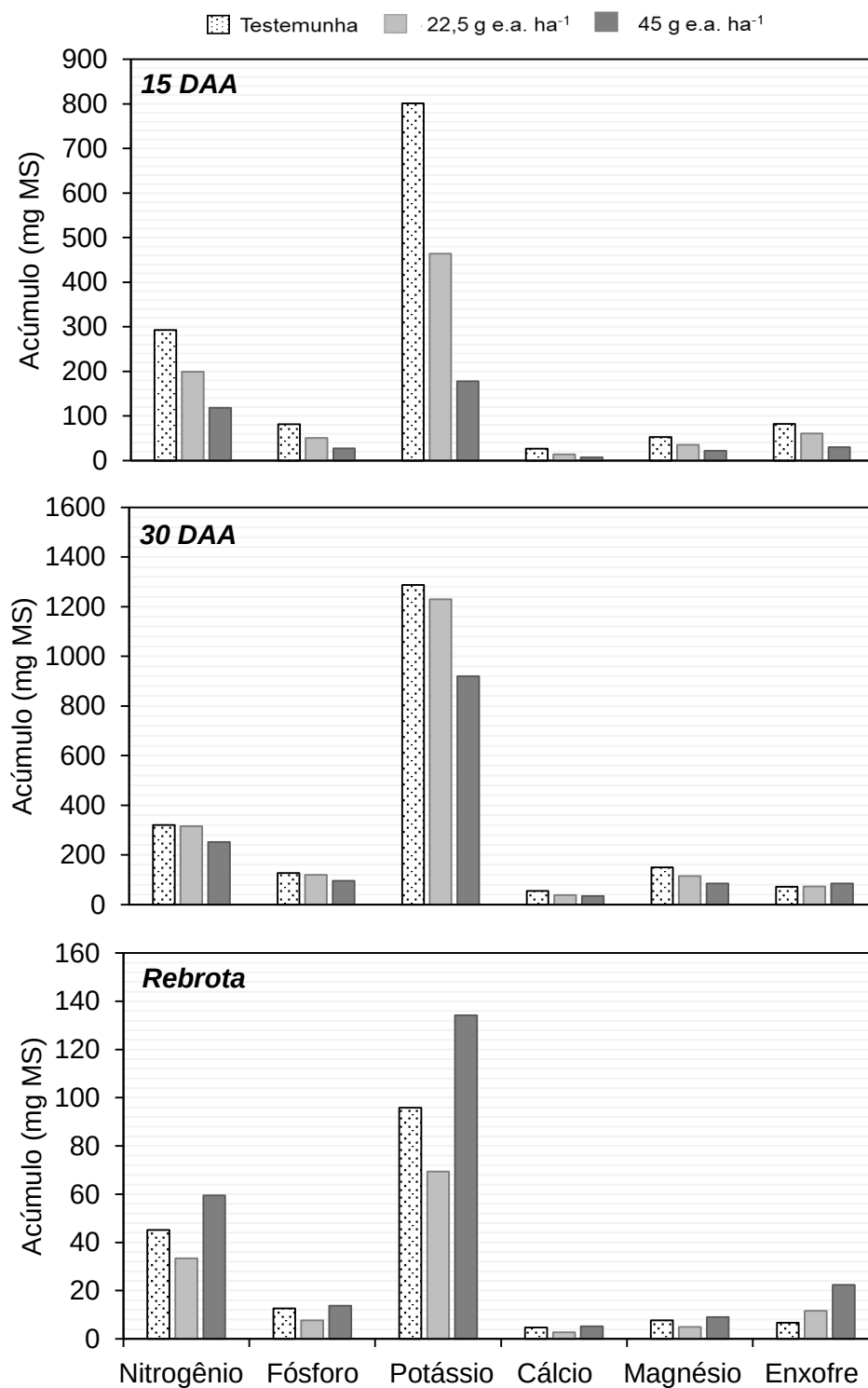
Em relação ao S, no presente trabalho as plantas de *U. decumbens* tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ apresentaram teores elevados, com aumentos de 41,5% e 119,5% aos 15 e 30 DAA, respectivamente, e de até 94% nas plantas da rebrota na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹. Assim como, Bortolheiro (2019) observou que a dose de 1,8 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate aumentou em 31% o teor de S em plantas de feijão na safra de inverno.

De acordo com Cakmak et al. (2009), o glyphosate pode provocar distúrbios nutricionais pela imobilização de determinados nutrientes nas plantas, além de interferir na sua absorção e translocação. Desse modo, as diferenças entre os teores dos macronutrientes encontrados em *U. decumbens* podem ser explicadas pelo fato do glyphosate ser transportado pelo floema e interagir com os nutrientes presentes nas plantas, impactando no balanço nutricional.

É importante considerar nesse estudo que os menores teores de macronutrientes verificados principalmente na testemunha, como N, P, K e S, não se deve à influência direta do glyphosate sobre os nutrientes, mas também sobre a produção de massa seca das plantas. Com isso, pode ter ocorrido algum efeito de diluição dos teores nas folhas, justificado pela sua redução. Segundo Silva et al. (1998), pode haver variação na taxa de redistribuição de nutrientes nas partes constituintes da planta de acordo com a espécie, o nutriente considerado, as práticas de manejo adotadas e a idade da planta.

Os acúmulos dos macronutrientes analisados nas plantas de *U. decumbens* aos 15 DAA, 30 DAA e na rebrota estão apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Acúmulo de macronutrientes em plantas de *Urochloa decumbens* em função dos períodos de coleta



Na coleta da parte aérea realizada aos 15 DAA, o acúmulo de todos os macronutrientes reduziram nas plantas que receberam a aplicação de glyphosate. Para a dose de 45 g e.a. ha⁻¹, foram verificados os menores valores, sendo inferiores à testemunha aproximadamente, 2,5 vezes para N, 3 vezes para P e 4,5 vezes para K. Para Ca, Mg e S as reduções foram da ordem de 3,5, 2 e 3 vezes, respectivamente, em relação à testemunha.

Do mesmo modo, na coleta realizada aos 30 DAA, o acúmulo dos nutrientes reduziu de maneira significativa nas plantas tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹, quando comparadas com as que não receberam a aplicação, com exceção do S.

No entanto, na rebrota das plantas houve variação no acúmulo dos macronutrientes, nos quais verificou-se redução de P, Ca e Mg na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ e aumento de N, K e S na dose de 45 g e.a. ha⁻¹, sendo os valores superiores à testemunha.

O S é componente de coenzimas e vitaminas, como coenzima A, S-adenosilmetionina, biotina, vitamina B1 e glutathione, uma molécula antioxidante e a principal forma de S reduzido (TAIZ et al., 2017). Alguns herbicidas, como o glyphosate, podem ser conjugados à glutathione pela enzima glutathione-S-transferase (GST), resultando em conjugados solúveis em água e de baixa toxicidade (MONQUERO et al., 2004). Uma possível explicação para o elevado acúmulo de S nas doses de glyphosate testadas seria o aumento da atividade da GST nas plantas de *U. decumbens* induzido pelo herbicida, proporcionando a desintoxicação das mesmas. Contudo, estudos mais detalhados sobre a atividade da GST nessa espécie devem ser realizados.

Outro fato a ser considerado é que após a absorção de S na forma de sulfato, este é reduzido e incorporado aos aminoácidos, que são redistribuídos para as partes da planta em crescimento. Como as plantas que receberam a aplicação da maior dose de glyphosate apresentaram redução no crescimento, é possível que tenha ocorrido acúmulo do S, uma vez que esse nutriente tende a ficar mais retido em folhas velhas (SILVA et al., 2003).

Ao final das avaliações dos macronutrientes nas plantas de *U. decumbens*, foi calculada a absorção dos nutrientes aos 15 DAA, 30 DAA e na rebrota, conforme apresentado nas Tabelas 22, 23 e 24.

Aos 15 DAA diferenças significativas ($p \leq 0,05$) foram encontradas entre as doses testadas para N, P, K, Ca e S, assim como os contrastes entre a testemunha e os

tratamentos com aplicação de glyphosate significativos ao nível de 5% de probabilidade, indicando que a absorção dos macronutrientes pelas plantas foi influenciada pela aplicação das baixas doses de glyphosate (Tabela 22). Ocorreram reduções na absorção de N, P e Ca quando as plantas foram tratadas com a dose de 45 g e.a. ha⁻¹, enquanto a absorção de K reduziu a partir da dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹. Para S, houve aumento na absorção na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ e redução em 45 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate.

Aos 30 DAA foi possível observar que o glyphosate não interferiu na absorção dos nutrientes, uma vez que não foram encontradas diferenças significativas entre as doses de glyphosate testadas, com exceção do S. Para esse nutriente, o contraste entre a testemunha e a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ foi significativo ($p \leq 0,05$), indicando que houve aumento na sua absorção (Tabela 23).

Na rebrota das plantas, as baixas doses de glyphosate também influenciaram a absorção dos nutrientes, sendo encontradas diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade entre as doses para todos os macronutrientes, e os contrastes entre a testemunha e os tratamentos com glyphosate significativos. Houve aumento na absorção de N, K e S na dose de 45 g e.a. ha⁻¹ e redução na absorção de P, Ca e Mg na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹.

Nesse caso, é importante destacar que as plantas tratadas com 45 g e.a. ha⁻¹ antes do corte apresentaram redução no crescimento e no consumo de água. Fazendo um paralelo com os resultados de massa seca, desse modo é possível que a entrada de nutrientes ou o mecanismo de transporte pelas raízes tenham sido afetados pela aplicação do herbicida. Com isso, após o corte, os nutrientes que não foram utilizados ou que permaneceram estocados no substrato, tiveram efeito positivo na rebrota, promovendo maior acúmulo de biomassa.

Com relação ao aumento na absorção de S, verificou-se que a aplicação de glyphosate não interferiu na sua absorção, uma vez que as plantas tratadas com o herbicida continuaram absorvendo esse nutriente. Pode existir nesse caso, a expressão de algum gene transportador de S relacionado ao processo de desintoxicação da planta, a raiz ter sido eficiente no seu transporte, ou ainda por outro processo metabólico desconhecido.

Tabela 22 - Médias de absorção de macronutrientes por litro de água em plantas de *Urochloa decumbens* aos 15 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Fósforo (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Potássio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p
0	153,88	-	1	42,83	-	1	417,99	-	1
22,5	167,83	1,88	0,175	41,53	0,44	0,506	377,55	4,88	0,031
45	135,29	3,34	0,073	30,45	40,88	<0,001	206,04	134,2	<0,001
F Doses		5,16	0,009		24,70	<0,001		75,70	0,001
F Época		30,85	<0,001		8,29	<0,001		21,36	<0,001
DMS (t p≤0,05)	20,36			3,88			36,64		
CV (%)	21,10			15,99			17,33		
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Magnésio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Enxofre (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p
0	14,11	-	1	27,31	-	1	43,86	-	1
22,5	12,40	2,44	0,124	28,33	0,43	0,514	52,44	5,29	0,025
45	9,28	19,48	<0,001	25,31	1,65	0,204	34,36	6,49	0,014
F Doses		10,02	<0,001		1,95	0,151		11,78	<0,001
F Época		101,5	<0,001		2,82	0,098		58,61	<0,001
DMS (t p≤0,05)	2,19			3,11			7,47		
CV (%)	28,96			18,22			27,06		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 23 - Médias de absorção de macronutrientes por litro de água em plantas de *Urochloa decumbens* aos 30 dias após aplicação, em função das doses do herbicida glyphosate

Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Fósforo (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Potássio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p
0	72,40		1	27,73	-	1	278,53	-	1
22,5	81,79	1,49	0,233	29,95	1,35	0,255	307,23	0,99	0,327
45	85,58	2,94	0,098	31,53	3,95	0,057	296,31	0,38	0,541
F Doses		1,56	0,227		2,00	0,154		0,51	0,607
F Época		69,15	<0,001		0,90	0,351		8,33	0,007
DMS (t p≤0,05)	15,79			3,93			59,05		
CV (%)	21,49			14,38			21,85		
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Magnésio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Enxofre (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p
0	11,53	-	1	33,93	-	1	15,47	-	1
22,5	9,22	2,87	0,102	29,51	2,73	0,110	18,63	1,15	0,292
45	10,87	0,23	0,632	28,48	4,16	0,052	27,40	16,40	<0,001
F Doses		1,53	0,234		2,35	0,113		8,81	0,001
F Época		35,60	<0,001		51,52	<0,001		0,40	0,534
DMS (t p≤0,05)	2,79			5,50			6,05		
CV (%)	28,83			19,51			32,13		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

Tabela 24 - Médias de absorção de macronutrientes por litro de água da rebrota de plantas de *Urochloa decumbens*, em função das doses do herbicida glyphosate

Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Nitrogênio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Fósforo (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Potássio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p
0	79,56	-	1	22,09	-	1	166,33	-	1
22,5	67,51	1,02	0,322	15,77	9,08	0,006	138,66	1,38	0,250
45	102,74	3,77	0,063	24,21	1,03	0,319	226,85	6,61	0,016
F Doses		4,51	0,020		8,78	0,001		7,35	0,003
F Época		39,44	<0,001		59,81	<0,001		60,00	<0,001
DMS (t p≤0,05)	24,52			4,31			48,36		
CV (%)	32,03			22,66			29,67		
Doses (g e.a. ha ⁻¹)	Cálcio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Magnésio (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p	Enxofre (mg MS L ⁻¹)	F	Valor p
0	8,38	-	1	14,42	-	1	12,22	-	1
22,5	5,53	5,20	0,031	10,28	4,36	0,047	22,36	3,71	0,065
45	8,81	0,12	0,730	16,03	0,66	0,423	36,39	21,10	<0,001
F Doses		4,08	0,027		4,49	0,020		10,64	0,001
F Época		29,85	<0,001		9,69	0,004		37,93	<0,001
DMS (t p≤0,05)	2,57			4,07			10,81		
CV (%)	36,90			32,65			49,73		

MS: Massa seca; DMS: Diferença mínima significativa; CV: Coeficiente de variação.

5 CONCLUSÕES

A dose de 45 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate reduziu o consumo de água acumulado, o acúmulo de macronutrientes e a biomassa das plantas de *U. decumbens* até 30 DAA.

Na dose de 22,5 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate os mesmos efeitos foram observados, porém foram menos intensos e menos persistentes.

A aplicação da dose de 45 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate aumentou o perfilhamento das plantas de *U. decumbens*.

A análise dos acúmulos de massa seca, valores de consumo de água e acúmulos de nutrientes, mostraram que a dose de 45 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate foi a mais efetiva e com maior potencial de uso para reduzir o crescimento de plantas de *U. decumbens* em áreas agrícolas e não-agrícolas.

A ação das baixas doses de glyphosate alterou o metabolismo das plantas, com redução no acúmulo dos aminoácidos aromáticos e ácidos fenólicos nos períodos avaliados, com exceção na rebrota.

A aplicação de baixas doses de glyphosate resultou em menor absorção de macronutrientes pelas plantas, com exceção do enxofre, até 15 DAA e durante a rebrota.

REFERÊNCIAS

- AHSAN, N. et al. Glyphosate-induced oxidative stress in rice leaves revealed by proteomic approach. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 46, n. 12, p. 1062-1070, 2008.
- ALVINO, C. A. et al. Interferência e controle de plantas daninhas nas culturas agrícolas. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, n. 20, p. 1-4, 2011.
- AMRHEIN, N. et al. The site of the inhibition of the shikimate pathway by glyphosate II. Interference of glyphosate with chorismate formation in vivo and *in vitro*. **Plant Physiology**, v. 66, n. 5, p. 830-834, 1980.
- ARALDI, R. et al. Análises de fluorescência e consumo de água em *Brachiaria decumbens* após aplicação de herbicidas em pós-emergência. **Planta Daninha**, v. 29, p. 1053-1060, 2011.
- BALASUBRAMANIAN, S.; ABELL, C.; COGGINS, J. R. Observation of an isotope effect in the chorismate synthase reaction. **Journal of the American Chemical Society**, v. 112, n. 23, p. 8581-8583, 1990.
- BECERRIL, J. M.; DUKE, S. O.; LYDON, J. Glyphosate effect on shikimate pathway products in leaves and flowers of velvet leaf. **Phytochemistry**, v. 28, n. 3, p. 695-699, 1989.
- BELZ, R. G.; DUKE, S. O. Herbicides and plant hormones. **Pest Management Science**, v. 70, n. 5, p. 698-707, 2014.
- BEHRENS, R. et al. Terminology Committee Report: Weed Society of America. **Weeds**, v. 4, n. 3, p. 278-287, 1956.
- BERTONCELLI, D. J. et al. Efeito do glifosato no cultivo in vitro de *Cattleya nobilior* Rchb. F. **Revista Ceres**, v. 65, n. 2, p. 165-173, 2018.
- BEZUTTE, A. J. et al. Efeito da densidade de plantas de *Brachiaria decumbens* sobre o crescimento inicial de *Eucalyptus grandis*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 20., 1995. Florianópolis. **Resumos [...]** Florianópolis: 1995. p. 272-273.
- BIANCO, S.; TONHÃO, M. A. R.; PITELLI, R. A. Crescimento e nutrição mineral de capim-braquiária. **Planta Daninha**, v. 23, n. 3, p. 423-428, 2005.
- BORTOLHEIRO, F. P. A. P. **Fotossíntese, concentração de nutrientes e produtividade do feijoeiro submetido à aplicação de subdoses de glyphosate**. 2019. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2019.

BOTT, S. et al. Glyphosate-induced impairment of plant growth and micronutrient status in glyphosate-resistant soybean (*Glycine max* L.). **Plant and Soil**, v. 312, n. 1, p. 185-194, 2008.

BOUDET, A. M.; GRAZIANA, A.; RANJEVA, R. Recent advances in the regulation of the prearomatic pathway. In: VAN SUMERE, C. F.; LEA, P. J. (Eds.). **Annual proceedings of the Phytochemical Society of Europe**, Oxford: Clarendon Press, 1985. v. 25, p. 135-159.

BRESNAHAN, G. A. et al. Glyphosate applied preharvest induces shikimic acid accumulation in hard red spring wheat (*Triticum aestivum*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, n. 14, p. 4004-4007, 2003.

BRIGHENTI, A. M.; DE OLIVEIRA, M. F. Biologia de plantas daninhas. In: OLIVEIRA JR, R. S.; CONSTANTIN J.; INOUE, M. H. **Biologia e manejo de plantas daninhas**. Curitiba: Omnipax, 2011. cap. 1, p.1-37.

BUCHANAN, B. B.; GRUISSEM, W.; JONES, R. L. **Biochemistry and Molecular Biology of Plants**. 3 ed. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000.

CAKMAK, I. et al. Glyphosate reduced seed and leaf concentrations of calcium, manganese, magnesium, and iron in non-glyphosate resistant soybean. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 114-119, 2009.

CARBONARI, C. A.; MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D. Efeito da aplicação de glyphosate no crescimento inicial de mudas de eucalipto submetidas a dois níveis de adubação fosfatada. In: I Simpósio Internacional sobre Glyphosate, 2007, Botucatu. **Anais...**, Botucatu, SP, 2007. p. 68-70.

CARVALHO, F. P. et al. Photosynthetic activity of coffee after application of glyphosate subdoses. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 35, n. 1, p. 109-115, 2013.

COOLEY, W. E.; FOY, C. L. Effects of SC-0224 and glyphosate on free amino acids, soluble protein, and protein synthesis in inflated duckweed (*Lemna gibba*). **Weed Science**, v. 40, n. 3, p. 345-350, 1992.

CORREIA, N. M.; SANTOS, E. A. Teores foliares de macro e micronutrientes em milho tolerante ao glyphosate submetido à herbicidas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 34, n. 6, p. 3165-3172, 2013.

COX, C. Glyphosate (Roundup). **Journal of Pesticide Reform**, v. 18, n. 3, p. 10-15, 1998.

DA SILVA, J. C. et al. The impact of water regimes on hormesis by glyphosate on common bean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 2, p. 237, 2016.

DELLA-CIOPPA, G. et al. Translocation of the precursor of 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase into chloroplasts of higher plants *in vitro*. **Proceedings of National Academy of Sciences**, v. 83, n. 18, p. 6973-6877, 1986.

- DENIS, M. H.; DELROT, S. Carrier-mediate uptake of glyphosate in broad bean (*Vicia faba*) via a phosphate transporter. **Physiologia Plantarum**, v. 87, n. 4, p. 569-575, 1993.
- DEVINE, M. D.; BANDENN, J. D.; MCKERSIE, B. D. Temperature effects on glyphosate absorption, translocation and distribution quackgrass (*Agropyron repens*). **Weed Science**, v. 31, n. 4, p. 461-464, 1993.
- DICK, R. E.; QUINN, J. P. Glyphosate-degrading isolates from environmental samples: occurrence and pathways of degradation. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 43, n. 3, p. 545-550, 1995.
- DILL, G. M. et al. Glyphosate: discovery, development, applications, and properties. In: Nandula, V. K. **Glyphosate resistance in crops and weeds: history, development, and management**, 2010. cap. 1, p. 1-33.
- DILL, G. M. Glyphosate-resistant crops: history, status and future. **Pest Management Science**, v. 61, n. 3, p. 219-224, 2005.
- DUKE, S. O. et al. Effects of glyphosate on the mineral content of glyphosate resistant soybeans (*Glycine max*). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 60, n. 1, p. 6764-6771, 2012.
- DUKE, S. O. The history and current status of glyphosate. **Pest Management Science**, v. 74, n. 5, p. 1027-1034, 2018.
- DUKE, S. O.; POWLES, S. B. Glyphosate: a once-in-a-century herbicide. **Pest Management Science**, v. 64, n. 4, p. 319-325, 2008.
- EKER, S. et al. Foliar-applied glyphosate substantially reduced uptake and transport of iron and manganese in sunflower (*Helianthus annus* L.) plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 1, p. 10019-10025, 2006.
- FAGUNDES, J. L. et al. Acúmulo de forragem em pastos de *Brachiaria decumbens* adubados com nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 4, p. 397-403, 2005.
- FEDTKE, C.; DUKE, S. O. Herbicides. In: HOCK, B.; ELSTNER, E. F. (Eds). **Plant Toxicology**. New York: Marcel Dekker, 2005. p. 247–330.
- FERNÁNDEZ-ESCALADA, M. et al. Characterization of the *Amaranthus palmeri* physiological response to glyphosate in susceptible and resistant populations. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 64, n. 1, p. 95-106, 2016.
- FERREIRA, E. A. et al. Distribuição de glyphosate e acúmulo de nutrientes em biótipos de azevém. **Planta Daninha**, v. 26, n. 1, p. 165-173, 2008.
- FERREIRA, G. L. et al. Eucalypt growth submitted to management of *Urochloa* spp. **Planta Daninha**, v. 34, n. 1, p. 99-107, 2016.

FRANÇA, A. C. et al. Teores de nutrientes em cultivares de café arábica submetidos à deriva de glyphosate. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 877-885, 2010.

FRANZ, J. E.; MAO, M. K.; SIKORSKI, J. A. Uptake, transport and metabolism of glyphosate in plants. In: **Glyphosate: a unique global herbicide**. Washington: American Chemical Society, 1997. p. 143-181.

GHERSA, C. M.; HOLT, J. S. Using phenology prediction in weed management: a review. **Weed Research**, v. 35, n. 6, p. 461-470, 1995.

GIESY, J. P.; DOBSON, S.; SOLOMON, K. R. Ecotoxicological risk assessment for Roundup herbicide. **Reviews of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 167, p. 35-120, 2000.

GODOY, M.C. **Efeitos do glyphosate sobre o crescimento e absorção de fósforo pela soja**. 2007. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

GOMES, G. L. G. C. **Alterações metabólicas de plantas de milho submetidas à aplicação de glyphosate e fosfito**. 2011. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Proteção de Plantas) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2011.

GOMES, M. P. et al. Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: an overview. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 17, p. 4691-4703, 2014.

GOULART, J. C. **Citogenética e anatomia foliar de acessos e progênies de *Brachiaria***. 2008. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2008.

GRAVENA, R. et al. Low glyphosate rates do not affect *Citrus limonia* (L.) Osbeck seedlings. **Pest Management Science**, v. 65, n. 4, p. 420-425, 2009.

HALTER, S. História do herbicida agrícola glyphosate. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate**. 1 ed. Botucatu: FEPAF, 2009. p. 11-16.

HASLAM, E. **Shikimic acid: metabolism and metabolites**. Chinchester, UK: John Wiley, 1993.

HAWKES, T. R. et al. Chorismate synthase. Pre-steady-state kinetics of phosphate release from 5-enolpyruvylshikimate 3-phosphate. **Biochemical Journal**, v. 265, n. 3, p. 899-902, 1990.

HERNANDEZ, A.; GARCÍA-PLAZAOLA, J. I.; BECERRIL, J. M. Glyphosate effects on phenolic metabolism of nodulated soybean (*Glycine max* L. Merr.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 47, n. 7, p. 2920-2925, 1999.

HERRMANN, K. M. The shikimate pathway: early steps in the biosynthesis of aromatic compounds. **The Plant Cell**, v. 7, n. 7, p. 907-919, 1995.

HESS, F. D. Herbicide effects on plant structure, physiology, and biochemistry. *In*: ALTMAN, J. **Pesticide interactions in crop production. Beneficial and deleterious effects**. London: CRC Press, 1993, p. 13-34.

JENSEN, R. A. The shikimate arogenate pathway-link between carbohydrate metabolism and secondary metabolism. **Physiologia Plantarum**, v. 66, n. 1, p. 164-168, 1986.

KAPPES, C. et al. Resposta da crotalária a épocas e subdoses de aplicação de glifosato. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 3, p. 373-383, 2012.

KIELAK, E. et al. Phytotoxicity of Roundup Ultra 360 SL in aquatic ecosystems: Biochemical evaluation with duckweed (*Lemna minor* L.) as a model plant. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 99, n. 3, p. 237-243, 2011.

KIRKWOOD, R. C.; MCKAY, I. Accumulation and elimination of herbicides in select crop and weed species. **Pesticide Science**, v. 42, p. 241-249, 1994.

KISSMANN, K. G.; GROTH, D. **Plantas infestantes e nocivas**. 2.ed. v.2. São Paulo: BASF, 1999.

KOGER, C. H. et al. Rice (*Oryza sativa*) response to drift rates of glyphosate. **Pest Management Science**, v. 61, n. 12, p. 1161-1167, 2005.

KREMER, R. J.; MEANS, N. E. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. **European Journal of Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 153-161, 2009.

KUVA, M. A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar: III-capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) e capim-colonião (*Panicum maximum*). **Planta Daninha**, v. 21, n. 1, p. 37-44, 2003.

KUVA, M. A. et al. Períodos de interferência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar: II-Capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*). **Planta Daninha**, v. 19, n. 3, p. 323-330, 2001.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas**. 3.ed. Nova Odessa: Plantarum, 2000.

LUCHINI, L. C. Considerações sobre algumas propriedades físico-químicas do glyphosate. *In*: VELINI, E.D. et al. **Glyphosate**. 1 ed. Botucatu: FEPAF, 2009. v. 1, p. 21-30.

LYDON, J.; DUKE, S. O. Glyphosate induction of elevated levels of hydroxybenzoic acids in higher plants. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 36, n. 4, p. 813-818, 1988.

MACEDO, G. C. **Crescimento, desenvolvimento e produtividade de arroz submetido a baixas doses de glyphosate**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2018.

MACHADO, L. A. Z.; CECCON, G. Sistemas integrados de agricultura e pecuária. *In*: PIRES, A.V. (Ed.). **Bovinocultura de corte**. Piracicaba: FEALQ, 2010. v. 2, p.1401-1462.

MADSEN, K. H. et al. Photosynthetic parameters in glyphosate-treated sugar-beet (*Beta vulgaris* L.). **Weed Research**, v. 32, n. 1, p. 81-88, 1995.

MAEDA, H.; DUDAREVA, N. The shikimate pathway and aromatic amino acid biosynthesis in plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 63, p. 73-105, 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997.

MARÍA, N. et al. New insights on glyphosate mode of action in nodular metabolism: role of shikimate accumulation. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 54, n. 7, p. 2621-2628, 2006.

MARÍA, N.; FELIPE, M. R.; FERNANDEZ-PASCUAL, M. Alterations induced by glyphosate on lupin photosynthetic apparatus and nodule ultrastructure and some oxygen diffusion related proteins. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 43, n. 10-11, p. 985-996, 2005.

MAROLI, A. S. et al. Metabolic profiling and enzyme analyses indicate a potential role of antioxidant systems in complementing glyphosate resistance in an *Amaranthus palmeri* biotype. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 41, p. 9199-9209, 2016.

MARQUES, R. P. **Características anatômicas foliares e controle químico em pósemergência de *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria plantaginea***. 2009. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009.

MATALLO, M. B. et al. Acúmulo de ácido chiquímico em plantas de *Brachiaria decumbens* pulverizadas com sub-doses de glyphosate. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS DANINHAS, 25., 2003, Brasília. **Trabalhos apresentados** [...]. Brasília, DF: SBCPD, 2006. p. 219.

MATALLO, M. B. et al. Microwave-assisted solvent extraction and analysis of shikimic acid from plant tissues. **Planta Daninha**, v. 27, p. 987-994, 2009.

MEDEIROS, W. N. et al. Crescimento inicial e concentração de nutrientes em clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sob interferência de plantas daninhas. **Ciências Florestais**, v. 26, n. 1, p. 147-157, 2016.

- MENDES-BONATO, A. B. et al. Meiotic instability in invader plants of signal grass *Brachiaria decumbens* Stapf (Gramineae). **Acta Scientiarum**, v. 23, n. 2, p. 619-625, 2001.
- MERVOSH, T. L.; BALKE, N. E. Effects of calcium, magnesium and phosphate on glyphosate absorption by cultured plant cells. **Weed Science**, v. 39, n. 3, p. 347-353, 1991.
- MESCHEDE, D. K. et al. Efeitos de baixas doses de glyphosate na nutrição de plantas. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate**. 1 ed. Botucatu: FEPAF, 2009. v. 1, p. 401-411.
- MONQUERO, P. A. et al. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, v. 22, n. 3, p. 445-451, 2004.
- MONQUERO, P. A.; SILVA, A. C. Efeito do período de chuva no controle de *Euphorbia heterophylla* e *Ipomoea purpurea* pelos herbicidas glyphosate e sulfosate. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n. 2, p. 399-404, 2007.
- MONTEALEGRE, F.; VARGAS, J. P. Efecto de algunas practicas culturales sobre la población de arroz rojo y los rendimientos del arroz comercial. **Arroz**, v. 38, n. 359, p. 19-24, 1989.
- MORIN, F. et al. Glyphosate uptake in *Catharanthus roseus* cells: role of a phosphate transporter. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 58, n. 1, p. 13-22, 1997.
- MOUSDALE, D. M.; COGGINS, J. R. Amino acid synthesis. In: KIKWOODD, R.C. **Target Sites for herbicide actions**. Glasgow: University of Strathclyde, 1991, p. 29-56.
- ORCARAY, L. et al. The possible role of quinate in the mode of action of glyphosate and acetolactate synthase inhibitors. **Pest Management Science**, v. 66, n. 3, p. 262-269, 2010.
- PEREIRA NICOLAU, B. A. et al. Morfoanatomia foliar de *Brachiaria decumbens* Stapf, coletada na zona rural de Lavras, estado de Minas Gerais, Brasil. **Revista Científica**, v. 10, n. 1, p. 1-6, 2010.
- PERIM, L.; PRANDO, M. B.; ROSOLEM, C. A. Cinética de absorção de fósforo em soja transgênica após a aplicação de glyphosate. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 10, n. 2, p. 143-150, 2011.
- PETERSEN, I. L. et al. Metabolic effects in rapeseed (*Brassica napus* L.) seedlings after root exposure to glyphosate. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 89, n. 83, p. 220-229, 2007.

PETERSON, M. I. et al. New simplified inhibitors of EPSP synthase: The importance of ring size for recognition at the shikimate 3-phosphate site. **Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters**, v. 6, n. 23, p. 2853-2858, 1996.

PETTER, F. A. et al. Effect of glyphosate and water stress on plant morphology and nutrient accumulation in soybean. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 2, p. 251, 2016.

PITELLI, R. A. Competição e controle das plantas daninhas em áreas agrícolas. **Série técnica IPEF**, v. 4, n. 12, p. 1-24, 1987.

QUEIROZ, J. R. G. et al. Eficiência da aplicação da mistura de glyphosate com saflufenacil sobre plantas de *Brachiaria decumbens*. **Revista Brasileira de Herbicidas**, v. 13, n. 1, p. 1-7, 2014.

RABELLO, W. S. et al. Produção de massa seca e teores de nutrientes do feijoeiro comum submetido à deriva de glyphosate em duas classes de solo. **Revista Ceres**, v. 62, n. 4, p. 384-391, 2015.

RABELLO, W. S.; MONERAT, P. H.; VASCONCELOS JUNIOR, J. F. S. Composição mineral do feijoeiro comum cultivar BR1 Xodó sob efeito hormético de subdoses de glyphosate. **Global Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 86-94, 2014.

RAVN, H. W. et al. New phytochemical screening method for biomarkers in plants exposed to herbicides. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 75, n. 2, p. 236-245, 2005.

REAM, J. E. et al. EPSP synthase: binding studies using isothermal titration microcalorimetry and equilibrium dialysis and their implications for ligand recognition and kinetic mechanism. **Biochemistry**, v. 31, n. 24, p. 5528-5534, 1992.

REDDY, K. N. et al. Aminomethylphosphonic acid accumulation in plant species treated with glyphosate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 6, p. 2125-2130, 2008.

REDDY, K. N.; BELLALLOUI, N.; ZABLOTOWICZ, R. M. Glyphosate effect on shikimate, nitrate reductase activity, yield, and seed composition in corn. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 6, p. 3646-3650, 2010.

REGITANO, J. B.; CASTRO, N. R. A. Sorção e dessorção do glyphosate no solo. In: VELINI, E.D. et al. **Glyphosate**. Botucatu: FEPAF, 2009. p. 153-178.

RIZZARDI, M. A. Competição por recursos do solo entre ervas daninhas e culturas. **Ciência rural**, v. 31, n. 4, p. 707-714, 2001.

RODRIGUES, L. R. A.; RODRIGUES, T. J. D. Estabelecimento de capins do gênero *Cynodon* em áreas de *Brachiaria* spp. In: WORKSHOP SOBRE O POTENCIAL FORRAGEIRO DO GÊNERO *CYNODON*, 1996, Juiz de Fora. **Anais [...]** Juiz de Fora: EMBRAPA-CNPGL, 1996. p. 9-21.

RUITNER, H.; MEINEN, E. Influence of water stress and surfactant on the efficacy, absorption, and translocation of glyphosate. **Weed Science**, v. 46, n. 3, p. 289-296, 1998.

SANTOS, E. D. G. et al. Avaliação de pastagem diferida de *Brachiaria decumbens* Stapf.: 1. Características químico-bromatológicas da forragem durante a seca. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 33, n. 1, p. 203-213, 2004.

SANTOS, J. B. et al. Avaliação de formulações de glyphosate sobre soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 165-171, 2007a.

SANTOS, L. D. T. et al. Crescimento e concentração de nutrientes na parte aérea de eucalipto sob efeito da deriva do glyphosate. **Cerne**, v. 13, n. 4, p. 347-352, 2007b.

SATICHIVI, N. M. et al. Absorption and translocation of glyphosate isopropylamine and trimethylsulfonium salts in *Abutilon theophrasti* and *Setaria faberi*. **Weed Science**, v. 48, n. 6, p. 675-679, 2000.

SERRA, A. P. et al. Influência do glifosato na eficiência nutricional do nitrogênio, manganês, ferro, cobre e zinco em soja resistente ao glifosato. **Ciência Rural**, v. 41, n. 1, p. 77-84, 2011.

SHAW, W. C. Integrated weed management systems technology for pest management. **Weed Science**, v. 30, n. 1, p. 2-12, 1982.

SILVA, A. C.; SANTOS, A. D.; PAIVA, A. D. Translocação de nutrientes em folhas de *Hevea brasiliensis* (clone) e em acículas de *Pinus oocarpa*. **Revista da Universidade de Alfenas**, v. 4, n. 1, p. 11-18, 1998.

SILVA, D. J. et al. Translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 6, p. 715-721, 2003.

SILVA, F. M. L. et al. Low doses of glyphosate change the responses of soyabean to subsequent glyphosate treatments. **Weed Research**, v. 56, n. 2, p. 124-136, 2015.

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. 165-174, 2016.

SILVA, W. et al. Índice de consumo e eficiência do uso da água em eucalipto, submetido a diferentes teores de água em convivência com braquiária. **Floresta**, v. 34, n. 3, p. 325-335, 2004.

SINGH, B. K.; SHANER, D. L. Rapid determination of glyphosate injury to plants and identification of glyphosate-resistant plants. **Weed Technology**, v. 12, n. 3, p. 527-530, 1998.

SOUZA, L. S. et al. Efeito alelopático de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) sobre o crescimento inicial de sete espécies de plantas cultivadas. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 657-668, 2006.

SOUZA, L. S.; VELINI, E. D.; MAIOMONI-RODELLA, R. C. S. Efeito alelopático de plantas daninhas e concentrações de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) no desenvolvimento inicial de eucalipto (*Eucalyptus grandis*). **Planta Daninha**, v. 21, n. 3, p. 343-354, 2003.

STEINRUCKEN, H. C.; AMRHEIN, N. The herbicide glyphosate is a potent inhibitor of 5-enolpyruvylshikimic acid 3- phosphate synthase. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, v. 94, n. 4, p. 1207-1212, 1980.

SVIRIDOV, A. V. et al. Microbial degradation of glyphosate herbicides. **Applied Biochemistry and Microbiology**, v. 51, n. 2, p. 188-195, 2015.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAN, S.; EVANS, R.; SINGH, B. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. **Amino Acids**, v. 30, n. 2, p. 195-204, 2006.

TIMOSSI, P. C.; DURIGAN, J. C.; LEITE, G. J. Eficácia de glyphosate em plantas de cobertura. **Planta Daninha**, v. 24, n. 3, p. 475-480, 2006.

VALLE, C. B.; JANK, L.; RESENDE, R. M. S. O melhoramento de forrageiras tropicais no Brasil. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 460-472, 2009.

VALLE, C. B.; SAVIDAN, Y. H. Genetics, cytogenetics, and reproductive biology of *Brachiaria*. In: MILES, J. W.; MAASS, B. L.; VALLE, C. B.; KUMBLE, V. (Eds.). **Brachiaria: Biology, agronomy, and improvement**, Cali: CIAT; Campo Grande: EMBRAPA-CNPQC, 1996. p. 147-163.

VALLE, C. B.; SAVIDAN, Y. H.; JANK, L. Apomixis and Sexuality in *Brachiaria decumbens* Stapf. In: XVI INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 16., Nice. **Proceedings** [...]. The French Grassland Society, 1989. p. 407-408.

VELINI, E. D. et al. Características e usos do glyphosate. In: VELINI, E. D. et al. **Glyphosate: uso sustentável**. Botucatu: FEPAF, 2012.

VELINI, E. D. et al. Growth regulation and other secondary effects of herbicides. **Weed Science**, v. 58, n. 3, p. 351-354, 2010.

VELINI, E. D. et al. Modo de ação de glyphosate. In: VELINI, E.D. et al. **Glyphosate**. 1 ed. Botucatu: FEPAF, 2009. v. 1, p. 113-134.

VIDAL, R. A. **Herbicidas: mecanismos de ação e resistência de plantas**. Porto Alegre, RS: Ed. do autor, 1997.

WANG, C. J.; LIU, Z. Q. Foliar uptake of pesticides: present status and future challenge. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 87, n. 1, p. 1-8, 2007.

WANG, C. Y. Effect of glyphosate on aromatic amino acid metabolism in purple nutsedge (*Cyperus rotundus*). **Weed Technology**, v. 15, n. 4, p. 628-635, 2001.

WEBER, A. P. M.; SCHWACKE, R.; FLUGGE, U. I. Solute transporters of the plastid envelope membrane. **Annual Review of Plant Biology**, v. 56, p. 133-164, 2005.

YAMADA, T.; CASTRO, P. R. C. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas e agronômicas. **Informações Agronômicas**, n. 119, p. 1-32, 2007.

ZABALZA, A. et al. The pattern of shikimate pathway and phenylpropanoids after inhibition by glyphosate or quinate feeding in pea roots. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 141, p. 96-102, 2017.

ZABLOTOWICZ, R. M.; REDDY, K. N. Nitrogenase activity, nitrogen content, and yield responses to glyphosate in glyphosate-resistant soybean. **Crop Protection**, v. 26, n. 3, p. 370-376, 2007.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Glyphosate affects seed composition in glyphosate-resistant soybean. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, n. 1, p. 4517-4522, 2010.

ZOBIOLE, L. H. S. et al. Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation, and nodulation in glyphosate-resistant soybean. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 175, n. 2, p. 319-330, 2012.