

FATORES AMBIENTAIS QUE AFETAM A EFICÁCIA DE GLIFOSATO: SÍNTESE DO CONHECIMENTO

RIBAS ANTONIO VIDAL*
FORTUNATO PAGNONCELLI JR.**
MARCUS VINICIUS FIPKE***
ANDREW RERISON SILVA DE QUEIROZ***
HENRIQUE VON HERTWIG BITTENCOURT****
MICHELANGELO MUZELL TREZZI*****

A presente revisão objetivou organizar e sintetizar o conhecimento disponível na literatura com respeito aos fatores ambientais que afetam a eficácia do glifosato. Foram abordados os seguintes aspectos: temperatura, umidade relativa do ar, solo, irradiância, disponibilidade de nutrientes e o estado nutricional das plantas, ocorrência de chuva após a aplicação do produto, assim como a interação entre o ambiente e as características morfológicas e fenológicas das plantas. Verificou-se que, em geral, temperatura e estado nutricional das plantas ótimos para o crescimento vegetal favorecem a eficácia do glifosato no controle de infestantes. Umidade relativa do ar superior a 65 % tende a facilitar a absorção do herbicida. Irradiância elevada auxilia a ação de glifosato, mas há espécies vegetais em que o sombreamento parcial favorece o controle com o herbicida. A maioria dos trabalhos da literatura consultados trata da avaliação do efeito de fatores isoladamente. No entanto, como em condições reais ocorre a associação dos fatores de estresse mencionados há a necessidade de trabalhos de campo que avaliem a interação entre eles.

PALAVRAS-CHAVE: HERBICIDA; GLIFOSATO; IRRADIÂNCIA; UMIDADE RELATIVA; NUTRIENTES.

- * Engenheiro Agrônomo, Ph.D. em Weed Science, Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Pesquisador do CNPQ, Porto Alegre, RS (e-mail: ribas.vidal@gmail.com).
- ** Engenheiro Agrônomo, Doutorando, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curso de Agronomia, UTFPR, Pato Branco, PR (e-mail: fpagnoncelli@outlook.com).
- *** Engenheiro Agrônomo, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Departamento de Plantas de Lavoura, UFRGS, Porto Alegre, RS (e-mail: marfipke@gmail.com, andrew_rerison@hotmail.com).
- **** Engenheiro Agrônomo, Mestrando, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Curso de Agronomia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Pato Branco, PR (e-mail: henriqueagroeco@gmail.com).
- ***** Engenheiro Agrônomo, Doutor em Fitotecnia, Professor, UTFPR, Pesquisador do CNPQ, Pato Branco, PR (e-mail: trezzim@gmail.com).

1 INTRODUÇÃO

O herbicida glifosato controla plantas mono e dicotiledôneas. A molécula inibe a atividade da enzima enol-piruvil shiquimato fostato sintase (EPSPS), a qual está presente na rota de biossíntese dos aminoácidos fenilalanina, tirosina e triptofano (PADGETTE *et al.*, 1991). O glifosato, uma das moléculas mais hidrofílicas dentre os herbicidas, apresenta coeficiente de partição octanol:água reduzido. Trata-se de uma glicina fosfonada, com pka biológico de 5,6 e elevada capacidade quelatizante (VIDAL, 2002).

O glifosato tornou-se um dos herbicidas mais comercializados do mundo, principalmente depois da liberação de culturas transgênicas resistentes ao produto. A redução do seu valor pela perda da patente (WOODBURN, 2000) tem ocasionado à utilização indiscriminada do glifosato. Muitas vezes, a falta de conhecimento leva ao incremento da dose para alcançar controle adequado das plantas daninhas. Esse aumento da dose de glifosato pode ocasionar diversos efeitos colaterais, destacando-se a lixiviação (VERECKEN, 2005; RUIZ-TOLEDO *et al.*, 2014), o impacto em organismos não alvo (CASABE *et al.*, 2007) e, principalmente, o favorecimento da seleção de plantas daninhas resistentes ao produto (ROSO e VIDAL, 2010).

O objetivo desta revisão foi sintetizar o conhecimento sobre os fatores ambientais que afetam a eficácia do herbicida glifosato.

2 TEMPERATURA

O impacto da temperatura do ar na eficácia do controle de plantas daninhas por glifosato envolve o comportamento das plantas e do herbicida (REDDY *et al.*, 2000; MARTINSON *et al.*, 2005). A temperatura do ar interfere no crescimento e no desenvolvimento das plantas, afetando a transpiração e aspectos fisiológicos relacionados ao *status* hídrico das plantas que exercem influência sobre a hidratação da cutícula e a absorção mineral (MARTINSON *et al.*, 2005). Além disso, o processo físico da difusão de herbicidas pela cutícula foliar é afetado diretamente pela temperatura do ar (VIDAL, 2002).

Para espécies vegetais adaptadas ao verão, o incremento da temperatura do ar até valores ótimos para o metabolismo da planta favorece o desempenho do herbicida glifosato (SHARMA e SINGH, 2001; WALTZ *et al.*, 2004; MARTINSON *et al.*, 2005; ZHOU *et al.*, 2007). Dentre os fatores que explicam o elevado desempenho de glifosato em temperaturas mais elevadas destacam-se a maior absorção e translocação do herbicida pela planta (SHARMA e SINGH, 2001; FREY, HERMS e CARDINA, 2007), bem como maiores atividades metabólicas (REDDY *et al.*, 2000) e enzimáticas (FREY, HERMS e CARDINA, 2007). Plantas de *Brunnichia ovata* absorveram 35 % de glifosato quando se desenvolveram sob temperaturas do ar de 35/30 °C (dia/noite), contrastando com apenas 21 % de absorção em plantas cultivadas em temperaturas de 15/10 °C (REDDY, 2000). A absorção e a translocação de glifosato pela espécie *Desmodium tortuosum* aumentou 35 % e 26 % em temperatura de 22 °C em comparação à condição de 16 °C (SHARMA e SINGH, 2001).

Valores de temperatura do ar superiores ao ótimo para determinada espécie vegetal causam estresse às plantas, desencadeando reações para evitar a perda de água por transpiração e prejudicando, conseqüentemente, a ação de glifosato (ZANATTA *et al.*, 2007). Pode haver incremento do conteúdo de cera epicuticular e, portanto, aumento da hidrofobicidade da superfície foliar das plantas. Sob essas condições, a retenção e a absorção da molécula de glifosato foram prejudicadas em plantas de *Brunnichia ovata* (CHACALIS, REDDY e ELMORE, 2001), *Commelina benghalensis* (MONQUEIRO *et al.*, 2004) e *Euphorbia heterophylla* L. (ZANATTA *et al.*, 2007).

Para as espécies vegetais anuais de inverno e, portanto, metabolicamente ativas em condição fria, a eficácia de controle com glifosato pode ser elevada mesmo sob baixos valores de temperaturas do ar (FREY, HERMS e CARDINA, 2007; ZHOU *et al.*, 2007). Observou-se elevada eficácia (87 a 94 %) de glifosato para reduzir a densidade populacional de *Alliaria petiolata* em aplicações efetuadas sob temperatura do ar entre -4,2 a 7 °C (FREY, HERMS e CARDINA, 2007).

Resumidamente, a elevação da temperatura do ar até valores para ótima atividade metabólica da espécie favorece a eficácia de glifosato no controle das plantas daninhas porque auxilia a absorção e a translocação do produto pela planta. Tal tendência também foi observada em espécies vegetais adaptadas a condições mais frias, o que explica a eficácia desse herbicida no controle das plantas daninhas mesmo sob baixas temperaturas do ar.

3 UMIDADE RELATIVA DO AR

Elevada atividade do herbicida glifosato sob alta umidade relativa do ar (URA) pode favorecer sua absorção pelas plantas e intensificar sua translocação (JORDAN, 1977). Dessa forma, condições de URA superiores a 65 % auxiliam a eficácia de glifosato no controle de diversas espécies vegetais, incluindo *Cynodon dactylon* (JORDAN, 1977), *Avena fatua* e *Urochloa panicoides* (ADKINS *et al.*, 1998) e *Desmodium tortuosum* (SHARMA e SINGH, 2001). Por exemplo, a magnitude do impacto de glifosato em *Cynodon dactylon* foi duplicada em plantas aspergidas com o produto sob URA de 100 % em relação à condição de 40 % (JORDAN, 1977).

A URA afeta diretamente o *status* hídrico da planta, modificando a abertura estomática e a permeabilidade cuticular (ZANATTA *et al.*, 2007). Em teoria, a hidratação da cutícula favorece a difusão de herbicidas hidrossolúveis, como o glifosato. No entanto, a remoção da cera cuticular da superfície foliar de cinco espécies vegetais mostrou pouca influência na taxa de difusão de glifosato (SANTIER e CHAMEL, 1998). Assim, outros fatores devem estar envolvidos na melhor eficácia do glifosato sob elevada URA, incluindo-se o fato de que maior hidratação da planta possibilita prolongada interação da gota do herbicida com a cutícula foliar.

A utilização de surfactantes pode melhorar a absorção de glifosato em condições de baixa URA, mas esses compostos não garantem a máxima eficácia de glifosato observada em condições de URA adequadas (HUNSCHE e NOGA, 2012).

4 ORVALHO

A formação de orvalho depende da umidade relativa do ar e da temperatura. O ar pode reter maior quantidade de vapor de água sob temperaturas elevadas que em baixas temperaturas e, portanto, com o resfriamento há condensação (ROMAN *et al.*, 2004). A presença de orvalho pode favorecer ou prejudicar o desempenho de herbicidas altamente solúveis em água, tais como o glifosato (KOGAN e ZUNIGA, 2001). Pode ocorrer melhoria da atividade do glifosato quando o orvalho redistribui o herbicida e mantém a molécula hidratada na superfície foliar. Há prejuízo na eficácia do glifosato quando o orvalho lava ou remove o produto da folha (SANTOS *et al.*, 2004; ROMAN *et al.*, 2004).

A excessiva diluição do herbicida pelo orvalho pode prejudicar a absorção de glifosato porque reduz a diferença de concentração entre o exterior e o interior da cutícula foliar (VIDAL, 2002). O orvalho que propiciou volume de água de 2.000 mL m⁻² prejudicou o controle de *Urochloa decumbens* (sin. *Brachiaria decumbens*) em comparação à condição de 750 mL m⁻² (SANTOS *et al.*, 2004).

O efeito do orvalho sobre a eficácia do glifosato depende do volume de calda aplicado. Assim, sob elevado volume de calda (450 L ha⁻¹) há escorrimento e lavagem do produto da folha, prejudicando a eficácia do glifosato (KOGAN e ZUNIGA, 2001).

5 CHUVA APÓS A APLICAÇÃO

Quando a chuva ocorre imediatamente após a aplicação de glifosato verifica-se redução de sua eficácia (JAKELAITIS *et al.*, 2001; PEDRINHO JR *et al.*, 2002; MARTINI, PEDRINHO JR e DURIGAN, 2003; WERLANG *et al.*, 2003; MONQUERO e SILVA, 2007). Estima-se que

seja necessário período mínimo sem precipitação para que o herbicida pulverizado sobre as plantas seja absorvido (PIRES, 2000). Constatou-se maior eficiência do glifosato em plantas de *Eichornia crassipes* e *Pistia stratiotes* quando a precipitação ocorreu duas horas após a aplicação, comparativamente à condição de chuva imediatamente após a aspersão (SOUZA *et al.*, 2011).

A absorção do glifosato pela cutícula é lenta e geralmente requer período de até seis horas sem chuvas após a aplicação para que o controle de plantas suscetíveis seja satisfatório (MARTINI, PEDRINHO JR e DURIGAN, 2003; MONQUERO e SILVA, 2007). Assim, a eficiência de glifosato no controle de *Euphorbia heterophylla* e *Ipomoea purpurea* foi prejudicada quando a chuva ocorreu próximo ao momento da sua aplicação (MONQUERO e SILVA, 2007).

A formulação de glifosato mostrou limitado impacto no período de tempo sem chuva após a aplicação quando foram avaliadas as espécies *Urochloa decumbens* (sin. *Brachiaria decumbens*) (WERLANG, 2003), *Digitaria horizontalis* (JAKELAITIS *et al.*, 2001), ou *Senna obtusifolia* (SOUZA *et al.*, 2014). Dependendo da espécie vegetal, da intensidade da chuva e da dose utilizada, a formulação de glifosato pode acelerar a absorção e reduzir o intervalo sem chuva após a aplicação, sendo a diferença dos resultados atribuída aos surfactantes e às concentrações de glifosato presentes na formulação (FENG, SANDBRINK e SAMMONS, 2000; MARTINI, PEDRINHO JR e DURIGAN, 2003).

6 SOLO SECO

A eficiência do glifosato tende a diminuir quando o solo passa por condição de déficit hídrico (MCWHORTER e AZLIN, 1978; DICKSON *et al.*, 1990; ZANATTA *et al.*, 2007). Verificou-se maior controle de *Sorghum halepense* em umidade do solo de 20 % em relação à condição de apenas 12 % (MCWHORTER e AZLIN, 1978). A tolerância de plantas de *Avena sativa* mantidas sob déficit hídrico de até 14 dias após a aplicação de glifosato foi maior que a de plantas irrigadas regularmente (DICKSON *et al.*, 1990).

A deficiência hídrica constitui um dos estresses ambientais que mais prejudicam a eficácia de glifosato. De fato, a atividade desse herbicida no controle de *Abutilon theophrasti* decresceu quando as plantas estavam estressadas com seca \geq encharcamento $>$ frio (ZHOU *et al.*, 2007).

A reduzida eficácia de glifosato no controle de plantas sob déficit hídrico está relacionada à sua baixa absorção e translocação (VITORINO e MARTINS, 2012). Além do impacto negativo na fotossíntese e no metabolismo vegetal, as folhas das plantas sob déficit hídrico apresentam orientação foliar vertical e reduzida área da superfície foliar, prejudicando a retenção de gotas e o contato do herbicida com a planta (LEVENE e OWEN, 1995). A planta submetida a longos períodos de seca apresenta espessamento da folha, aumento da densidade cuticular e da pilosidade da folha, além da desidratação dos tecidos, efeitos que afetam negativamente a penetração de glifosato (LEVENE e OWEN, 1995).

7 IRRADIÂNCIA

A presença de luz favorece a rota metabólica de síntese de aminoácidos aromáticos (AMRHEIN e HOLLANDER, 1981). Dessa forma, elevada intensidade luminosa auxilia a atividade de glifosato nas plantas (SANTOS JR *et al.*, 2013; SHARKHUU *et al.*, 2014).

A aplicação de glifosato no período diurno favorece sua atividade, comparativamente às aplicações realizadas ao entardecer e à noite (MARTINSON *et al.*, 2002; MOHR, SELLERS e SMEDA, 2007; STOPPS, NURSE e SIKKEMA, 2013). As aplicações efetuadas entre 9 e 18 horas resultaram em maior nível de controle da comunidade de plantas daninhas que as realizadas entre 21 e 6 horas (MARTINSON *et al.*, 2002). O controle de plantas de *Abutilon theophrasti* também se mostrou superior quando o glifosato foi aplicado durante o período diurno em comparação ao noturno (WALTZ *et al.*, 2004).

A intensa luminosidade nem sempre favorece a atividade do herbicida glifosato. Em plântulas de *Avena fatua* e *Urochloa panicoides* que se desenvolveram sob 0 e 50 % de sombreamento não foi detectado impacto da luz na eficácia de glifosato (ADKINKS *et al.*, 1998). Considera-se que o sombreamento reduz a relação entre a luz vermelha e o vermelho extremo (R:FR), o que favorece a atividade do glifosato. Por exemplo, a eficácia de glifosato no controle de *Paspalum conjugatum* mostrou-se diretamente proporcional ao nível de sombreamento (0, 32, 52 e 69 %) (SAHID, IBRAHIM e SAMIAH, 1996). Elevado controle de plantas de *Commelina benghalensis* e *Cyperus rotundus* aspergidas com glifosato foi obtido sob 50 % de sombreamento em relação à condição não sombreada (SANTOS JR *et al.*, 2013).

Várias causas podem explicar o efeito contraditório verificado em diversas pesquisas. Primeiramente, a atividade da enzima EPSPS é mais elevada em pH acima de 7, o que ocorre no estroma do cloroplasto na presença de luz (WERDAN, HELDT e MILOVANCEV, 1975). Nessa condição, a forma ionizada do glifosato, mais eficiente, inibe a rota de biossíntese dos aminoácidos aromáticos (COBB e READE, 2010). Em segundo lugar, a quantidade da enzima EPSPS disponível para a conversão de chiquimato em corismato mostrou-se mais acentuada em condições de baixa relação R:FR (sombra) (SHARKHUU *et al.*, 2014). Alternativamente, a intensidade luminosa modifica o microclima, alterando a temperatura e a umidade relativa do ar (CIESLIK, VIDAL e TREZZI, 2014), os quais afetam a eficácia de glifosato. Assim, em determinadas espécies vegetais a atividade de glifosato em condições de sombreamento moderado podem garantir maior absorção do produto pelas plantas. Tal fato pode ser ilustrado pela espécie dicotiledônea *Desmodium tortuosum* (SHARMA e SINGH, 2001).

8 DISPONIBILIDADE DE NUTRIENTES E ESTADO NUTRICIONAL DAS PLANTAS

Considera-se que a satisfação plena das necessidades nutricionais das plantas permite alta atividade metabólica, favorecendo a translocação e a ação do glifosato em várias plantas daninhas (DICKSON *et al.*, 1990; MITHILA *et al.*, 2008; NCEDANA, 2011; ALLISON, BOUTIN e CARPENTER, 2013). A atividade de glifosato em *Lolium multiflorum* foi menor quando as plantas se encontravam em solo pobre em nutrientes, possibilitando maior sobrevivência em relação àquelas que estavam em solos com maior quantidade de nutrientes. Isso fez com que doses eficazes no controle de plantas daninhas em situações de solo fértil se tornassem insuficientes (ou sub-doses) quando as infestantes estavam sob baixa disponibilidade nutricional (NCEDANA, 2011).

Trabalho realizado com *Amaranthus retroflexus* evidenciou que doses mais elevadas de glifosato foram necessárias para reduzir 50 % da massa das plantas na condição de baixa disponibilidade de N (0,7 mM), em comparação ao ambiente rico em N (7,7 mM) (CATHCART, CHANDLER e SWANTON, 2004). Fortes evidências para a hipótese apresentada também foram obtidas com *Abutilon theophrasti* e *Chenopodium album*. No ambiente pobre em N, o controle de plantas de ambas as espécies somente foi obtido com 169 g ha⁻¹ de glifosato, em contraste à dose de apenas 84 g ha⁻¹ no ambiente rico em N (MITHILA *et al.*, 2008).

Teoriza-se que ambiente rico em N favorece a eficácia do glifosato pela maior translocação do herbicida para o meristema. Em ambientes pobres em N há reduzida atividade fotossintética, resultando na diminuição da translocação de açúcares e, conseqüentemente, de glifosato (DICKSON *et al.*, 1990; MITHILA *et al.*, 2008; NCEDANA, 2011).

9 EFEITO DA POEIRA

Glifosato é fortemente adsorvido aos coloides e a presença de poeira na superfície das folhas reduz a sua eficácia (ZHOU, TAO e MESSERSMITH, 2006). Além disso, a argila e outros constituintes da poeira funcionam como barreira física para a penetração do glifosato nas plantas

(SPRANKLE, MEGGITT e PENNER, 1975; ZHOU, TAO e MESSERSMITH, 2006).

10 INTERAÇÃO ENTRE AMBIENTE E CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS E FENOLÓGICAS

Sob condições de elevada densidade populacional de plantas daninhas ocorrem modificações anatômicas, morfológicas e fisiológicas nos vegetais, com subsequente impacto na eficácia de herbicidas. Características como ângulo da folha, espessura foliar e tamanho de plantas daninhas no momento da aplicação podem favorecer ou prejudicar a atividade dos herbicidas (COSTA *et al.*, 2012; STOPPS, NURSE e SIKKEMA, 2013).

10.1 ÂNGULO FOLIAR

Quando a folha está posicionada verticalmente (reduzido ângulo da folha em relação ao colmo) há limitação à intercepção e retenção do herbicida (STEWART, NURSE e SIKKEMA, 2009). Em decorrência da menor área foliar exposta ao produto, a eficácia de absorção dos herbicidas aplicados em pós-emergência torna-se reduzida (MOHR, SELLERS e SMEDA, 2007; STOPPS, NURSE e SIKKEMA, 2013). A orientação do ângulo foliar afetou a eficácia de glifosato em *Abutilon theophrasti* (WALTZ *et al.*, 2004; ZHOU, TAO e MESSERSMITH, 2007). A diminuição do ângulo foliar de *A. theophrasti* reduziu o efeito de glifosato (MOHR, SELLERS e SMEDA, 2007).

Algumas estratégias permitem contornar a diminuição de eficiência de glifosato em plantas com reduzido ângulo foliar, destacando-se a seleção da hora do dia para a aplicação do herbicida (MOHR, SELLERS e SMEDA, 2007). A variação do ângulo foliar em função da hora do dia em algumas espécies provavelmente se deve a adaptação às diferentes condições de irradiância. Maior intensidade luminosa provoca incremento no ângulo foliar de determinadas espécies, fato que permite inclinação mais horizontal (WALTZ *et al.*, 2004). A aplicação de glifosato ao meio-dia permitiu aumento de 31 % no controle de *A. theophrasti* em comparação aos períodos de baixa luminosidade (MOHR, SELLERS e SMEDA, 2007).

10.2 PARÊNQUIMA PALIÇÁDICO/LACUNOSO

As estruturas anatômicas da folha (como parênquima) e sua espessura podem influenciar a deposição, a retenção, a absorção e a translocação de soluções aplicadas sobre as folhas (COSTA *et al.*, 2010). Em biótipos de *Lolium multiflorum* resistentes ao glifosato houve compactação das células do mesófilo (menor quantidade de espaços intercelulares) em relação aos biótipos suscetíveis (GALVAN *et al.*, 2012).

A espessura do parênquima esponjoso foi associada à eficiência de glifosato no controle de *Brassica juncea*. Os biótipos de *Brassica juncea* com elevado grau de tolerância ao glifosato apresentaram a espessura do parênquima esponjoso mais reduzida que as populações suscetíveis (HUANGFU, SONG e QIANG, 2009).

10.3 TAMANHO DA PLANTA

O estágio de desenvolvimento da planta pode alterar a efeito do glifosato. A eficácia desse herbicida mostrou-se reduzida em plantas de *Amaranthus rudis*, *Ambrosia trifida*, *Ipomea hederacea* e *Cyperus esculentus* quando a aplicação foi realizada em plântulas com 15 cm de estatura, em comparação às plântulas com 8 cm (HOSS *et al.*, 2003). O controle de *Eleusine indica* com glifosato aspergido nas plantas no estágio de 2 folhas revelou-se 66 % superior ao obtido quando as plantas estavam no perfilhamento (ULGUIM *et al.*, 2013).

O efeito de glifosato sobre plantas em diferentes estádios pode variar. Plantas de *C. album* nos estádios de 2, 4 e 6 folhas não apresentaram diferenças no grau de controle quando aspergidas

por glifosato (SIKKEMA *et al.*, 2004). Esse resultado pode ser atribuído, em parte, às doses utilizadas no trabalho. Doses reduzidas proporcionaram controle adequado de plantas mais jovens, mas não controlaram totalmente plantas em estádios mais desenvolvidos (SIVESIND *et al.*, 2011).

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maioria dos resultados sobre o impacto das condições do ambiente na eficácia de controle de glifosato foram obtidos em trabalhos experimentais realizados em câmaras de crescimento. O benefício desse método consiste no isolamento de uma ou poucas variáveis de forma a se compreender a magnitude do impacto de cada variável ambiental. Em campo, todavia, há ocorrência simultânea ou alternada de um ou mais fatores de estresse ambiental. Isto implica na necessidade de desenvolvimento de trabalhos com método apropriado para elucidar o impacto desses fatores em condições reais.

Em condições de campo, as folhas de plantas submetidas aos estresses ambientais tendem a modificar sua orientação, forma e anatomia, o que também prejudica a eficácia de glifosato no controle das infestantes. Especula-se que ambas as modificações (da planta e dos estresses ambientais) interajam entre si para prejudicar a eficácia de glifosato no controle das infestantes. A simples elevação da dose não tem sido a tática mais apropriada para garantir a eficácia de controle de herbicidas. Sugere-se que pesquisas em condições de campo e com espécies daninhas locais possibilitariam integrar o conhecimento e melhor dimensionar as doses recomendadas de glifosato, de forma a reduzir os impactos ambientais negativos e os custos de produção.

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL FACTORS THAT AFFECT THE EFFECTIVENESS OF GLYPHOSATE: SYNTHESIS OF THE KNOWLEDGE

The present literature review aimed to organize and synthesize the knowledge concerning environmental factors that affect the efficacy of glyphosate. The following aspects were addressed: temperature, relative humidity, soil, irradiance, available nutrients and nutritional status of the plants, occurrence of rain after application of the product, as well as the interaction between the environment and morphological and phenological characteristics of the plants. It was observed that optimum temperature and nutritional status for vegetal growth favor the efficacy of glyphosate against infestation. Relative humidity above 65 % tends to facilitate absorption of the herbicide. High irradiance favors the action of glyphosate, but there are species in which partial shadowing favors glyphosate efficacy. Most of the analyzed studies have evaluated the effect of factors separately. However, since in real conditions association among mentioned factors of stress further field studies are required in order to assess the interaction among them.

KEY-WORDS: HERBICIDE; TEMPERATURE; LIGHT; RELATIVE HUMIDITY; NUTRIENTS.

REFERÊNCIAS

- 1 ADKINS, S.W.; TANPIPAT, S.; SWARBRICK, J.T.; BOERSMA, M. Influence of environmental factors on glyphosate efficacy when applied to *Avena fatua* or *Urochloa panicoides*. **Weed Research**, Oxford, v.38, p.129-138, 1998.
- 2 ALLISON, J.; BOUTIN, C.; CARPENTER, D. Influence of soil organic matter on the sensitivity of selected wild and crop species to common herbicides. **Ecotoxicology**, London, v.22, n.8, p.1289-1302, 2013.
- 3 AMRHEIN, N.; HOLLANDER, H. Light promotes the production of shikimic acid in Buckwheat. **Naturwissenschaften**, Berlin, v.68, p.43-55 1981.
- 4 CASABE, N.; PIOLA, L.; FUCHS, J.; ONETO, M.L. *et al.* Ecotoxicological assessment of the effects of glyphosate and chlorpyrifos on an Argentine soya field. **Journal of Soils and Sediments**, Landsberg, v.7, n.4, p.232-239, 2007 .
- 5 CATHCART, R.J.; CHANDLER, K.; SWANTON, C.J. Fertilizer nitrogen rate and the response of weeds to herbicides. **Weed Science**, Lawrence, v.52, n.2, p.291-296, 2004.
- 6 CHACALIS, D.; REDDY, K.N.; ELMORE, C.D. Characterization of leaf surface, wax composition, and control of redvine

- and trumpetcreeper with glyphosate. **Weed Science**, Lawrence, v.49, n.2, p.156-163, 2001.
- 7 CIESLIK, L.F.; VIDAL, R.A.; TREZZI, M.M. Fomesafen toxicity to bean plants as a function of the time of application and herbicide dose. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.36, n.3, p.329-334, 2014.
 - 8 COBB, A.H.; READE, J.P. **Herbicides and plant physiology**. 2nd Ed. Oxford: Wiley-Blackwell, 2010. 286 p.
 - 9 COSTA, N.V.; MARTINS, D.; RODELLA, R.A.; RODRIGUES, A.C.P.; CARDOSO, L.A. Trinexapac-ethyl effect on the leaf anatomy of four turfgrass species. **Planta Daninha**, Viçosa, v.28, n.3, p.551-560, 2010.
 - 10 COSTA, N.V.; MARTINS, D.; RODELLA, R.A.; RODRIGUES-COSTA, A.C.P. Alterações anatômicas foliares em plantas de *Brachiaria subquadripa* submetidas à aplicação de herbicidas. **Planta Daninha**, Viçosa, v.30, n.2, p.253-261, 2012.
 - 11 DICKSON, R.L.; ANDREWS, M.; FIELD, R.J.; DICKINSON, E.L. Effect of water stress nitrogen and gibberellic acid on fluazifop and glyphosate activity on oats (*Avena sativa*). **Weed Science**, Champaign, v.38, p.54-61, 1990.
 - 12 FENG, C.C.P.; SANDBRINK, J.J.; SAMMONS, D.R. Retention, uptake, and translocation of 14 C-glyphosate from track-spray applications and correlation to rainfastness in velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Technology**, Lawrence, v.14, p.127-132, 2000.
 - 13 FREY, M.N.; HERMS, C.P.; CARDINA, J. Cold weather application of glyphosate for garlic mustard (*Alliaria petiolata*) control. **Weed Technology**, Lawrence, v.21, n.3, p.656-660, 2007.
 - 14 GALVAN, J.; RIZZARDI, M.A.; CARNEIRO, C.M.; BIANCHI, M.A. Leaf anatomy of *Lolium multiflorum* sensitive and resistant to glyphosate. **Planta Daninha**, Viçosa, v.30, n.2, p.407-413, 2012.
 - 15 HOSS, N.E.; AL-KHATIB, K.; PETERSON, D.E.; LOUGHIN, T.M. Efficacy of glyphosate, glufosinate, and imazethapyr on selected weed species. **Weed Science**, Lawrence, v.51, n.1, p.110-117, 2003.
 - 16 HUANGFU, C.; SONG, X.; QIANG, S. Morphological disparities in the epidermal and anatomical features of the leaf among wild *Brassica juncea* populations. **Weed Biology and Management**, Kyoto, v.9, n.1, p.232-242, 2009.
 - 17 HUNSCHE, M.; NOGA, G. Effects of relative humidity and substrate on the spatial association between glyphosate and ethoxylated seed oil adjuvants in the dried deposits of sessile droplets. **Pest Management Science**, Sussex, v.68, n.2, p.231-239, 2012.
 - 18 JAKELAITIS, A.; FERREIRA, L.R.; SILVA, A.A.; MIRANDA, G.V. Controle de *Digitaria horizontalis* pelos herbicidas glyphosate, sulfosate e glifosate potássico submetidos a diferentes intervalos de chuva após a aplicação. **Planta Daninha**, Viçosa, v.19, n.2, p. 279-285. 2001,
 - 19 JORDAN, T.N. Effects of temperature and relative humidity on the toxicity of glyphosate to bermudagrass (*Cynodon dactylon*). **Weed Science**, Champaign, v.25, p.448-451, 1977.
 - 20 KOGAN, M.; ZUNIGAN, M. Dew and spray volume effect on glyphosate efficacy. **Weed Technology**, Lawrence, v.15, p.590-593, 2001.
 - 21 LEVENE B.C.; OWEN, M.D.K. Effect of moisture stress and leaf age on bentazon absorption in common cocklebur (*Xanthium strumarium*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). **Weed Science**, Champaign, v.43, n.7, p.7-12, 1995.
 - 22 MARTINI, G.; PEDRINHO JUNIOR, A.F.F.; DURIGAN, J.C. Eficácia do herbicida glifosato-potássico submetido à chuva simulada após a aplicação. **Bragantia**, Campinas, v.62, n.1, p.39-45, 2003.
 - 23 MARTINSON, K.B.; DURGAN, B.R.; GUNSOLUS, J.L.; SOTHERN, R.B. Time of day of application effect on glyphosate and glufosinate efficacy. **Crop Management**, Madison, v. 4, n.1, 2005. doi:10.1094/CM-2005-0718-02-RS.
 - 24 McWHORTER, C.G.; AZLIN, W.R. Effects of environment on the toxicity of glyphosate to johnsongrass (*Sorghum halepense*) and soybean (*Glycine max*). **Weed Science**, Champaign, v.26, p.605-608, 1978.
 - 25 MITHILA, J.; SWANTON, C.J.; BLACKSHAW, R.E.; CATHCART, R.J.; HALL, J.C. Physiological basis for reduced glyphosate efficacy on weeds grown under low soil nitrogen. **Weed Science**, Lawrence, v.56, n.1, p.12-17, 2008.
 - 26 MOHR, K.; SELLERS, B.A.; SMEDA, R.J. Application time of day influences glyphosate efficacy. **Weed Technology**, Lawrence, v.21, n.1, p.7-13, 2007.
 - 27 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.
 - 28 MONQUERO, P.A.; CHRISTOFFOLETI, P.J.; MATAS, J.A.; HEREDIA, A. Caracterização da superfície foliar e das ceras epicuticulares em *Commelina benghalensis*, *Ipomoea grandifolia* e *Amaranthus hybridus*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.22, n.2, p.203-210, 2004.
 - 29 NCEDANA, C. **Soil factors affecting glyphosate efficacy in *Lolium* spp.** 2011. 71 s. Dissertation (Doctorate in

Agricultural Science) – University of Stellenbosch, Stellenbosch, 2011.

- 30 PADGETTE, S.R.; RE, D.B.; GASSER, C.S.; EICHHOLTZ, D.A. *et al.* Site-directed mutagenesis of a conserved region of the 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase active-site. **Journal of Biological Chemistry**, Bethesda, v.266, n.33, p.22364-22369, 1991.
- 31 PEDRINHO JR, A.F.F.; MARTINI, G.; FELICI, G.V.; PIVA, F.M.; DURIGAN, J.C. Momento da chuva após a aplicação e a eficácia dos herbicidas sulfosate e glyphosate aplicados em diferentes formulações. **Planta Daninha**, Viçosa, v.20, n.1, p.115-123, 2002.
- 32 PIRES, N.M.; FERREIRA, F.A.; SILVA, A.A.; CARDOSO, A.A.; OLIVEIRA, V.R Quantificação dos herbicidas glyphosate e sulfosate na água após simulação de chuva. **Planta Daninha**, Viçosa, v.18, n.3, p.491-499, 2000.
- 33 REDDY, K. Factors affecting toxicity, absorption, and translocation of glyphosate in redvine (*Brunnichia ovata*). **Weed Technology**, Lawrence, v.14, n.3, p.457-462, 2000.
- 34 ROMAN, E.S.; VARGAS, L.; RIBEIRO, M.C.F.; LUIZ, A.R.M. Influência do orvalho e volume de calda de aplicação na eficácia do glyphosate na dessecação de *Brachiaria plantaginea*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.22, n.3, p.479-482, 2004.
- 35 ROSO, A.C.; VIDAL, R.A. A modified phosphate-carrier protein theory is proposed as a on-target site mechanism for glyphosate resistance in weeds. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 28, p.1175-1185, 2010.
- 36 RUIZ-TOLEDO, J.; CASTRO, R.; RIVERO-PEREZ, N.; BELLO-MENDOZA, R. *et al.* Occurrence of glyphosate in water bodies derived from intensive agriculture in a tropical region of Southern Mexico. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, New York, v.93, n.3, p.289-293, 2014.
- 37 SAHID, I.B.; IBRAHIM, R.B.; SAMIAH, K. Effects of watering frequency, shade and glyphosate application on *Paspalum conjugatum* Berg (sourgrass). **Crop Protection**, Guildford, v.15, n.1, p.15-19, 1996.
- 38 SANTIER, S.; CHAMELA. Reassessment of the role of cuticular waxes in the transfer of organic molecules through plant cuticles. **Plant Physiology Biochemistry**, New Delhi, v. 36, n.3, p.225-231, 1998.
- 39 SANTOS, J.L.; CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JR., R.S.; INOUE, M.H.; SALES, J.G.C.; HOMEM, L.M. Influência do orvalho na eficiência do glyphosate sobre *Brachiaria decumbens*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.22, n.2, p.285-291, 2004.
- 40 SANTOS JR, A.; SANTOS, L.D.T.; COSTA, G.A.; BARBOSA, E.A.; LEITE, G.L.D.; MACHADO, V.D.; CRUZ, L.R. Manejo da tiririca e trapoeraba com glyphosate em ambientes sombreados. **Planta Daninha**, Viçosa, v.31, n.1, p.213-221, 2013.
- 41 SHARKHUU, A.; NARASIMHAN, M.L.; MERZABAN, J.S.; BRESSAN, R.A.; WELLER, S.; GEHRING, C. A red and far-red light receptor mutation confers resistance to the herbicide glyphosate. **The Plant Journal**, London, v.78, p.916-926, 2014.
- 42 SHARMA, S.D.; SINGH, M. Environmental factors affecting absorption and bio-efficacy of glyphosate in Florida beggarweed (*Desmodium tortuosum*). **Crop Protection**, Guildford, v.20, n.6, p.511-516, 2001.
- 43 SIKKEMA, P.H.; SHROPSHIRE, C.; HAMILL, A.S.; WEAVER, S.E.; CAVERS, P.B. Response of common lambsquarters (*Chenopodium album*) to glyphosate application timing and rate in glyphosate-resistant corn. **Weed Technology**, Lawrence, v.18, n.1, p.908-916, 2004.
- 44 SIVESIND, E.C.; GASKA, J.M.; JESCHKE, M.R.; BOERBOOM, C.M.; STOLTENBERG, D.E. Common lambsquarters response to glyphosate across environments. **Weed Technology**, Lawrence, v.25, n.1, p.44-50, 2011.
- 45 SOUZA, G.S.F.; CAMPOS, C.F.; MARTINS, D.; PEREIRA, M.R.R. Ação da chuva sobre a eficiência de glyphosate no controle de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.29, n.1, p.59-64, 2011.
- 46 SOUZA, G.S.F. *et al.* Action of rain on the efficiency of herbicides applied post-emergence in the control of *Senna obtusifolia*. **R. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v.45, n.3, p.550-557, 2014.
- 47 SPRANKLE, P.; MEGGITT, W.F.; PENNER, D. Adsorption, mobility, and microbial degradation of glyphosate in the soil. **Weed Science**, Champaign, v.23, n.3, p.229-234, 1975.
- 48 STEWART, C.L.; NURSE, R.E.; SIKKEMA, P.H. Time of day impacts postemergence weed control in corn. **Weed Technology**, Lawrence, v.23, n.3, p.346-355, 2009.
- 49 STOPPS, G.J.; NURSE, R.E.; SIKKEMA, P.H. The effect of time of day on the activity of postemergence soybean herbicides. **Weed Technology**, Lawrence, v.27, n.4, p.690-695, 2013.
- 50 ULGUIM, A.R.; VARGAS, L.; AGOSTINETTO, D.; MAGRO, T.D.; WESTENDORFF, N.R.; HOLZ, M.T. Manejo de capim pé-de-galinha em lavouras de soja transgênica resistente ao glifosato. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.1, p.17-24, 2013.
- 51 VERECKEN, H. Mobility and leaching of glyphosate: a review. **Pest Management Science**, Sussex, v.61, n.12, p.1139-1151, 2005 .

- 52 VIDAL, R.A. **Ação dos herbicidas**. Porto Alegre: Evangraf, 2002. 89 p.
- 53 VITORINO, H.S.; MARTINS, D. Efeito do déficit hídrico na eficiência de herbicidas e nas características bioquímicas de *Ipomoea grandifolia*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.30, n.1, p.185-191, 2012.
- 54 WALTZ, A.L.; MARTIN, A.R.; ROETH, F.W.; LINDQUISTG, J.L. Glyphosate efficacy on velvetleaf varies with application time of day. **Weed Technology**, Lawrence, v.18, n.4, p.931-939, 2004.
- 55 WERDAN, K.; HELDT, H.W.; MILOVANCEV, M. The role of pH in the regulation of carbonfixation in the chloroplast stroma: studies on CO₂ fixation in the light and dark. **Biochimica et Biophysica Acta**, Amsterdam, v.396, n.2, p.276-292, 1975.
- 56 WERLANG, R.C.; SILVA, A.A.; FERREIRA, L.R.; MIRANDA, G.V. Efeitos da chuva na eficiência de formulações e doses de glyphosate no controle de *Brachiaria decumbens*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.21, n.1, p.121-130, 2003.
- 57 WOODBURN, A.T. Glyphosate: production, pricing and use worldwide. **Pest Management Science**, Sussex, v.56, n.4, p.309-312, 2000.
- 58 ZANATTA, J.F.; PROCÓPIO, S.O.; MANICA, R.; PAULETTO, E.A.; CARGNELUTTI FILHO, A.; VARGAS, L.; SGANZERLA, D.C.; ROSENTHAL, M.D.A.; PINTO, J.J.O. Teores de água no solo e eficácia do herbicida glyphosate no controle de *Euphorbia heterophylla*. **Planta Daninha**, Viçosa, v.25, n.3, p.799-811, 2007.
- 59 ZHOU, J.; TAO, B.; MESSERSMITH, C.G. Soil dust reduces glyphosate efficacy. **Weed Science**, Lawrence, v.54, n.6, p.1132-1136, 2006.
- 60 ZHOU, J.; TAO, B.; MESSERSMITH, C.G.; NALEWAJA, J.D. Glyphosate efficacy on velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) is affected by stress. **Weed Science**, Lawrence, v.55, n.3, p.240-244, 2007.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES e do CNPQ.