

EFEITOS DO GLIFOSATO NAS PLANTAS: IMPLICAÇÕES FISIOLÓGICAS E AGRONÔMICAS

Tsuiooshi Yamada¹Paulo Roberto de Camargo e Castro²

ÍNDICE

1. Introdução	1
2. Modo de ação do glifosato	1
2.1. Composição química	1
2.2. Ação herbicida	2
2.3. Adsorção, dessorção e degradação no solo	3
3. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações fisiológicas	5
3.1. No metabolismo secundário	5
3.2. Na síntese de ácido indolilacético (IAA)	6
3.2.1. Efeitos de biorreguladores na diferenciação cambial ..	8
3.2.2. Auxina e o gravitropismo radicular	8
3.3. Na síntese de etileno	9
3.4. Na síntese de compostos fenólicos	10
3.4.1. Lignina	11
3.4.2. Flavonóides	11
3.4.3. Fitoalexinas	12
3.4.4. Antocianinas, flavonas e flavonóis	12
3.4.5. Taninos condensados	12
3.5. Na síntese de aminoácidos e de proteínas	12
3.6. Na ultraestrutura celular	13
3.7. Na permeabilidade de membranas	13
3.8. Na síntese de clorofila	14
3.9. Na fotossíntese, respiração e transpiração	14
3.10. Na germinação de sementes e no desenvolvimento das plantas	14
4. Efeitos do glifosato nas plantas: implicações agronômicas	15
4.1. Um pouco da estória	15
4.2. Transferência do glifosato da planta-alvo para a planta-não alvo	16
4.3. Efeitos do glifosato no aumento da suscetibilidade das plantas às doenças	17
4.4. Efeitos do glifosato na cultura de soja	18
4.5. Efeitos do glifosato na cultura de citros	23
4.6. Efeito do glifosato na cultura da cana-de-açúcar	26
5. Conclusões	27
6. Dedicatória	28
7. Referências	28

1. INTRODUÇÃO

O sistema de plantio direto (SPD) ocupa hoje cerca de 25 milhões de hectares ou 50% da área plantada com culturas anuais no Brasil. A adoção desta prática pelos agricultores só foi possível graças ao desenvolvimento de herbicidas, dos quais o glifosato é, sem dúvida, o mais importante e o mais utilizado não só no SPD como também nas culturas perenes. O SPD direto trouxe inegáveis benefícios à agricultura e ao ambiente. No entanto, os herbicidas, em especial o glifosato, causam também alguns efeitos colaterais indesejáveis.

É objetivo deste artigo analisar os mecanismos de ação do glifosato e seus possíveis efeitos colaterais para que sua utilização seja a mais eficiente possível.

2. MODO DE AÇÃO DO GLIFOSATO

2.1. Composição química

O glifosato (N-fosfometil glicina), cuja estrutura é mostrada na Figura 1, foi originalmente sintetizado em 1964 como potencial quelante industrial e seu uso como herbicida foi descrito apenas em 1971. Devido à limitada solubilidade (1,2% a 25°C) do ácido em água, os sais mais solúveis do ácido são preferidos para as formulações. O termo glifosato é geralmente utilizado para indicar tanto o ácido como seus sais, pois é reconhecido que eles são biologicamente equivalentes.

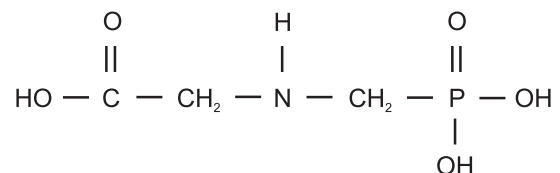


Figura 1. Estrutura química do glifosato.

O glifosato é um potente herbicida de pós-emergência, largo espectro, não seletivo, capaz de controlar efetivamente 76 das 78 plantas invasoras mais agressivas (FRANZ, 1985; QUINN, 1993; GRUYS e SIKORSKI, 1999).

¹ Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, diretor do IPNI, Piracicaba, SP. Telefone/fax: (19) 3433-3254, e-mail: yamada@ipni.com.br

² Engenheiro Agrônomo, Professor Titular de Fisiologia Vegetal, Departamento de Ciências Biológicas, ESALQ/USP, Piracicaba, SP. Telefone: (19) 3429-4268, e-mail: prcastro@esalq.usp.br

2.2. Ação herbicida

Uma das mais importantes características do glifosato é sua rápida translocação das folhas da planta tratada para as raízes, rizomas e meristemas apicais. Esta propriedade sistêmica resulta na destruição total de plantas invasoras perenes, difíceis de matar, tais como rizomas de *Sorghum halepense*, *Agropyron repens*, *Cirsium arvense*, *Cyperus* spp., *Cinodon dactylon*, *Imperata cilindrica* e mesmo *Pueraria lobata* (FRANZ, 1985; GRUYS e SIKORSKI, 1999).

Quando o glifosato é aplicado sobre as plantas, ocorre inicialmente uma rápida penetração, seguida por uma longa fase de lenta penetração, sendo que a duração dessas fases depende de numerosos fatores, incluindo espécie, idade, condições ambientais e concentração do glifosato e surfatante. O glifosato é móvel no floema e é rapidamente translocado por todas as partes da planta, mas tende a se acumular nas regiões meristemáticas. Foi sugerido que as cargas negativas da parede celular e do plasmalema repelem o glifosato, fortemente aniônico. Essa falta de uma forte ligação pode contribuir para o movimento do glifosato no apoplasto, ou seja, ele apresenta movimentação tanto simplástica como apoplástica. O herbicida pode penetrar na planta através de outras rotas. Turner e Loader (1974) demonstraram que formulações solubilizadas em óleo permitiram ao glifosato penetrar pela casca de espécies arbóreas. Raízes de cultivos em solução nutritiva contendo glifosato absorvem o herbicida, que se transloca através da planta (HADERLIE et al., 1978; GRUYS e SIKORSKI, 1999).

Através do simplasto, o glifosato aplicado nas folhas (fonte) é translocado para as regiões em crescimento no restante da planta (dreno), juntamente com os fotoassimilados (PETERSON et al., 1978).

Os sintomas comuns observados após a aplicação de glifosato são clorose foliar seguida de necrose. Outros sintomas foliares são: enrugamento ou malformações (especialmente nas áreas de rebrotamento) e necrose de meristema e também de rizomas e estolões de plantas perenes. Em contraste com muitos herbicidas de contato, os sintomas fitotóxicos de danos pelo glifosato geralmente desenvolvem-se lentamente, com a morte ocorrendo após vários dias e mesmo semanas. Devido ao longo tempo requerido, a estabilidade *in vivo* do glifosato é uma importante característica que contribui para seus efeitos fitotóxicos irreversíveis. Nas plantas, o glifosato é muito estável, com pequena degradação detectável ocorrendo em longo período de tempo (GRUYS e SIKORSKI, 1999).

O mecanismo de ação do glifosato é bastante singular porque ele é o único herbicida capaz de inibir especificamente a enzima 5-enolpiruvil-chiquimato-3-fosfato-sintase (EPSPs) (Figura 2) que catalisa a condensação do ácido chiquímico e do fosfato piruvato, evitando, assim, a síntese de três aminoácidos essenciais – triptofano, fenilalanina e tirosina (JAWORSKI, 1972; ZABLOTOWICZ e REDDY, 2004).

As enzimas EPSPs de todas as plantas, fungos e da maioria das bactérias isoladas e caracterizadas até hoje são inibidas pelo glifosato. O glifosato é um potente inibidor submicromolar da enzima EPSPs. As bactérias que superproduzem a EPSPs podem desenvolver-se na presença de concentrações que seriam tóxicas para

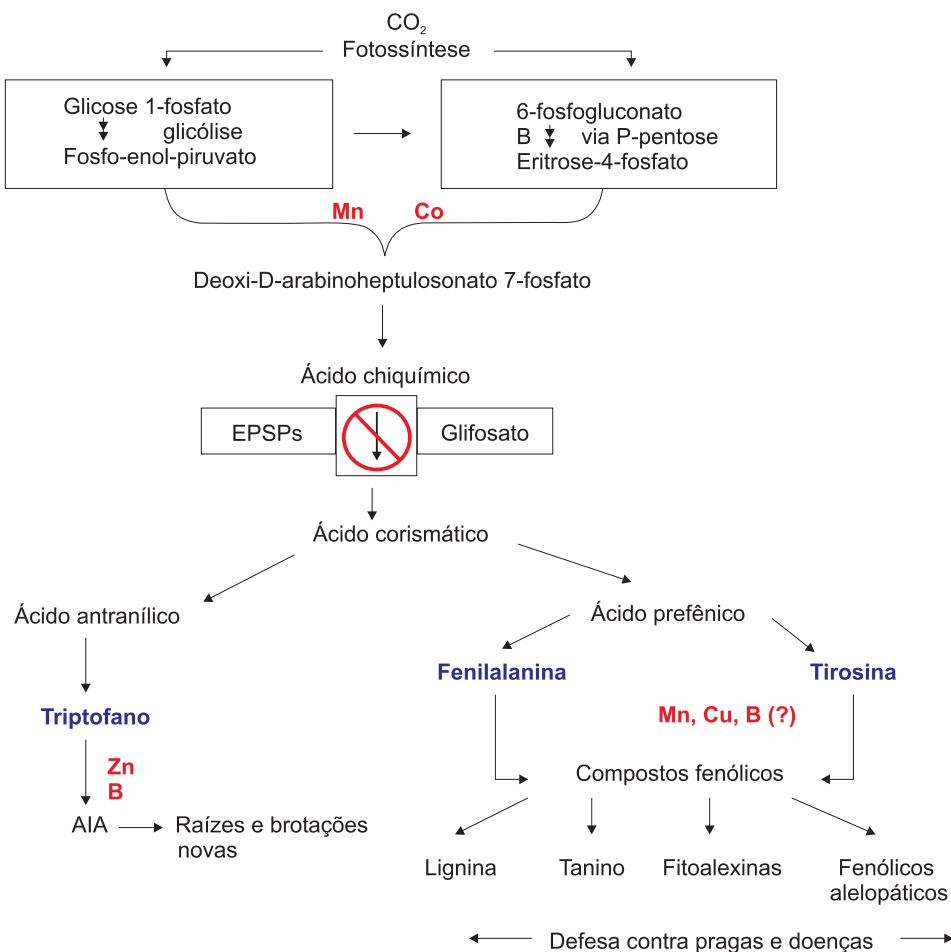


Figura 2. Ação do glifosato e de micronutrientes na rota do ácido chiquímico, que leva à formação de compostos envolvidos na defesa da planta contra pragas e doenças.

Fonte: Adaptada de GRAHAM e WEBB (1991).

outros organismos. Assim, a transferência de gene com tolerância ao glifosato a uma planta suscetível confere, a esta, a tolerância ao glifosato (GRUYS e SIKORSKI, 1999).

A disrupção da biossíntese dos aminoácidos aromáticos de plantas é uma estratégia atrativa para o desenvolvimento de herbicida com características ambientais favoráveis. Isto porque, apesar da rota do chiquimato estar presente em plantas e em muitos microrganismos, ela é completamente ausente em mamíferos, peixes, pássaros, répteis e insetos. Estas formas de vida não dependem da rota do chiquimato porque retiram da dieta os produtos aromáticos que necessitam. Já as plantas são obrigadas a produzir estes aminoácidos essenciais para sobreviver e se multiplicar (GRUYS e SIKORSKI, 1999).

Conforme pode-se observar na Figura 2, o ponto final da rota do chiquimato é a formação do corismato, a partir do qual muitos metabólitos secundários são formados. Entre estes temos tetrahidrofolato (THF), ubiquinona e vitamina K, que são essenciais para a vida da planta. A fenilalanina, além de participar da biossíntese de proteínas, é também substrato para a via do fenilpropanóide que produz numerosos produtos secundários de plantas, tais como antocianinas, lignina, promotores e inibidores de crescimento e compostos fenólicos. Muitos destes, implicados na defesa da planta contra doenças e pragas. O triptofano é precursor do ácido indolilacético (IAA), hormônio vegetal necessário para expansão celular, manutenção da dominância apical e muitos outros processos regulatórios (DEVINE et al., 1993; GRUYS e SIKORSKI, 1999).

2.3. Adsorção, dessorção e degradação no solo

Prata et al. (2000) mencionam que no solo o glifosato é caracterizado pela sua alta capacidade de sorção e que vários são os mecanismos explicando este fenômeno, tais como a troca de ligantes com óxidos de Fe e Al e as ligações de hidrogênio com as substâncias húmicas.

Prata e Lavorenti (2002) explicam que, via de regra, quanto menor a solubilidade em água de uma molécula, maior é a capacidade de sorção desta no solo. E que o comportamento do glifosato é a grande exceção desta regra, pois é uma molécula altamente solúvel em água e extremamente sorvida. Explicam ainda que a sorção do glifosato (Figura 3) está relacionada às forças de van der Waals, à formação de pontes de hidrogênio com as substâncias húmicas do solo, à troca iônica (o glifosato pode apresentar carga positiva e negativa ao mesmo tempo) e à formação de ligação covalente com os átomos metálicos dos óxidos do solo (semelhante à adsorção específica dos fosfatos inorgânicos). Mencionam que este último é o mecanismo mais importante para solos oxidicos e faz com que o glifosato permaneça no solo como resíduo-ligado.

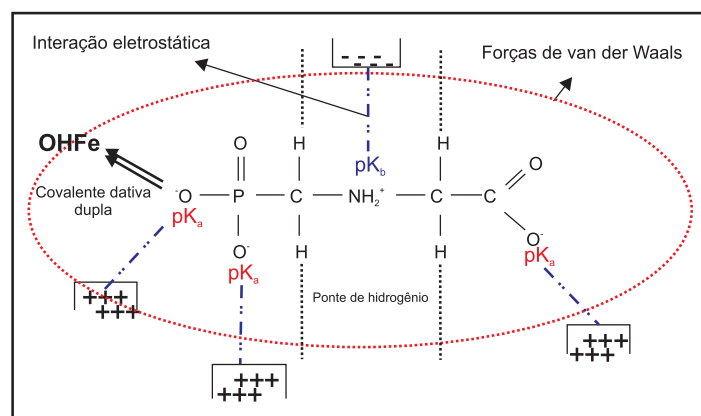


Figura 3. Esquema dos mecanismos envolvidos na sorção do glifosato. **Fonte:** PRATA e LAVORENTI (2002).

A taxa de metabolismo do glifosato no solo, em geral, é inicialmente rápida, mas, posteriormente, é seguida por um lento e prolongado período de degradação (MOSHIER e PENNER, 1978; NOMURA e HILTON, 1977). Nomura e Hilton (1977) sugerem que a fase inicial rápida representa a degradação do glifosato livre ou facilmente disponível no solo e que a fase lenta pode ser em função da demorada liberação do glifosato “aprisionado”. Eberbach (1998) observou rápida degradação do glifosato no primeiro dia da aplicação no solo, seguida de diminuição até o quadragésimo dia. Segundo o autor, a influência da adsorção restringiu a disponibilidade do glifosato para a biodegradação ao longo do tempo. Mesma tendência foi observada por Prata (2002). Ele avaliou a persistência do glifosato em Latossolo Vermelho distroférrico conduzido no sistema plantio direto ou convencional e observou que a meia-vida de mineralização variou entre 252,6 e 782,1 dias e a meia-vida de dissipação entre 14,5 e 25,8 dias. A persistência do herbicida foi maior no plantio convencional que no plantio direto, pois neste o óxido de ferro, o principal adsorvente de glifosato, está envolvido por compostos orgânicos, diminuindo, assim, sua adsorção.

Comparando tipos de argila e de adsorventes, Sprankle et al. (1975b) observaram ainda que a caulinita adsorvia mais glifosato que os outros materiais testados. Como a CTC segue a ordem: bentonita > ilita > caulinita > hidróxidos de ferro e alumínio, concluíram que a adsorção de glifosato não está relacionada com a CTC da argila, mas sim com o cátion saturando a argila. Na caulinita, o glifosato provavelmente está ligado nas bordas quebradas da argila e nos hidróxidos de ferro e alumínio através da substituição com hidroxilas (Tabela 1).

Tabela 1. Adsorção de ¹⁴C-glifosato por algumas argilas e hidróxidos.

Adsorvente	pH	Adsorção de glifosato (nM g ⁻¹ de adsorvente)
Caulinita	6,9	498,1 d
Ilita	7,3	276,3 c
Bentonita-Na	8,1	4,0 a
Hidróxido de ferro	10,8	39,7 b
Hidróxido de alumínio	3,8	6,6 a

Fonte: SPRANKLE et al. (1975b).

Sprankle et al. (1975b) concluíram ainda que a adsorção de ¹⁴C-glifosato à bentonita saturada com diferentes cátions seguia a ordem: Ca²⁺ < Mn²⁺ < Zn²⁺ < Mg²⁺ < Fe³⁺ < Al³⁺ (Tabela 2). A forte adsorção ao Al³⁺ e ao Fe³⁺ indicaria que o grupo fosfônico do glifosato estaria envolvido na adsorção e que competia com fosfatos inorgânicos pelos sítios de adsorção. O controle e as argilas saturadas com Na⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺ mostraram pobre desenvolvimento da planta, indicando a pequena adsorção do glifosato. O oposto ocorrendo nas argilas saturadas com Fe³⁺ e Al³⁺.

Estudos de adsorção de glifosato por solos e argilas minerais efetuados posteriormente por Glass (1987), embora corroborem com a sequência de adsorção de acordo com os cátions saturando a argila montmorilonita (Na⁺ < Ca²⁺ < Mg²⁺ < Cu²⁺ < Fe³⁺), mostram a adsorção crescendo na ordem: montmorilonita > ilita > caulinita. Estes resultados seriam consistentes com a hipótese de que o glifosato seria adsorvido entre os espaços interlaminares dos minerais de argila. O autor sugere ainda que a maior adsorção de glifosato com os cátions de maior valência seria devido à formação de complexos estáveis na solução entre glifosato e estes cátions deslocados para a solução do solo através do processo de troca com prótons da solução. Fenômeno este já percebido por Hensley et al. (1978) e Hoagland et al. (1979).

Tabela 2. Efeito de cátions na adsorção de glifosato pela argila bentonita avaliado pelo peso fresco de plantas de trigo com 16 dias de idade e pela técnica de radiotraçador.

Tratamento	pH	Glifosato (kg ha ⁻¹)		¹⁴ C-glifosato adsorvido (nM g ⁻¹ de argila)
		0	4,8	
		- - - (mg planta ⁻¹) - - -		
Controle	6,0	551 i ¹	38 a	0 a
Na ⁺	8,1	510 h	49 ab	0 a
Mg ²⁺	6,3	465 g	76 ab	260 e
Ca ²⁺	6,5	459 g	82 b	169 b
Zn ²⁺	6,7	253 d	207 c	201 d
Mn ²⁺	5,7	365 e	369 e	193 e
Fe ³⁺	5,4	425 fg	361 e	505 f
Al ³⁺	4,2	446 fg	404 ef	516 g

¹ Médias com letras similares não diferem pelo teste Duncan (5%).

Fonte: SPRANKLE et al. (1975b).

Para Hensley et al. (1978), a inativação do glifosato no solo seria por quelação, onde o tamanho do raio iônico explicaria as respostas observadas de maiores eficiências para Al³⁺, Fe³⁺ e Fe²⁺. Os cátions com menores raios iônicos poderiam ser quelatizados mas não os com maiores raios iônicos (Tabela 3). Os autores observaram que a atividade da solução de 23 mM de glifosato era bastante reduzida por FeCl₃ ou AlCl₃ com concentrações > 11,3 mM. Colocando-se FeCl₃ mais solução de glifosato em tubo de ensaio, formava-se um precipitado vermelho-castanho em quantidade crescente com o aumento da concentração de FeCl₃.

Tabela 3. Raios iônicos de alguns cátions usados nos estudos de desativação do glifosato.

Íon	Raio (Å)
Al ³⁺	0,51
Fe ³⁺	0,64
Fe ²⁺	0,74
Mg ²⁺	0,78
Mn ²⁺	0,80
Na ⁺	0,97
Ca ²⁺	0,99
K ⁺	1,33
NH ₄ ⁺	1,43

Fonte: HENSLEY et al. (1978), KINJO (s/d); BOHN et al. (1979).

Comentário muito interessante foi feito por Hoagland et al. (1979) a respeito da formação de complexos entre ácidos aminofosfônicos (como o glifosato) e íons metálicos em meio aquoso. Eles observaram que o CaSO₄ na solução reduzia o efeito inibitório do glifosato no crescimento das plantas. E que o excesso de Ca²⁺ poderia ser o antídoto através da complexação do glifosato por este cátion.

Outro importante mecanismo para inativação do glifosato no solo é sua adsorção através de substâncias húmicas, tanto na forma sólida como dissolvida. O glifosato une-se às substâncias húmicas via mecanismo de ligação com hidrogênio. E a adsorção é proporcional ao tamanho das moléculas das substâncias húmicas, devido ao maior número de ligações de hidrogênio nas moléculas maiores (PICCOLO et al., 1996).

A adsorção de glifosato pela matéria orgânica também é afetada pelo cátion que a está saturando. Como se observa na Tabela 4, o crescimento do trigo é menor quando a matéria orgânica está saturada com Na⁺ ou com Mg²⁺ em comparação com ela saturada com Ca²⁺. Interessante observar que o efeito do Ca foi maior quando saturando a CTC da matéria orgânica que a da argila bentonita. O esterco é também um ótimo inativador de glifosato (SPRANKLE et al., 1975b). Porém, Prata et al. (2000), estudando sorção e dessorção do glifosato em três solos diferentes, observaram que o glifosato foi extremamente sorvido aos mesmos, independentemente da presença da matéria orgânica. E que não houve dessorção do glifosato, ficando a maior parte como resíduo ligado com a fração mineral desses solos, principalmente óxidos de Fe e Al. O mesmo fenômeno também foi observado em trabalho mais recente de Prata et al. (2005).

Tabela 4. Efeito dos cátions ligados à matéria orgânica (M.O.) no peso fresco (PF) de plantas de trigo com 16 dias de idade.

Tratamento	Glifosato (kg ha ⁻¹)	
	0	4,48
		- - - (mg planta ⁻¹ PF) - - -
Controle – Areia	511	31
Esterco	392	305
M.O. saturada com Na ⁺	399	152
M.O. saturada com Mg ²⁺	398	151
M.O. saturada com Ca ²⁺	340	312

Fonte: SPRANKLE et al. (1975b).

No entanto, Piccolo et al. (1996) mostram que as substâncias húmicas do solo são capazes de adsorver grandes quantidades de glifosato devido às características moleculares favoráveis, como grande tamanho molecular e alta flexibilidade estereoquímica. Porém, o glifosato adsorvido à matéria orgânica pode ser facilmente dessorvido, como comentam Piccolo et al. (1996), e, assim, parte do glifosato aplicado no solo pode ficar apenas temporariamente ligado aos materiais húmicos pelas pontes de hidrogênio, podendo ser liberado após algum tempo. Como mostram alguns trabalhos.

Cheah et al. (1997), estudando a adsorção, dessorção e mobilidade de quatro pesticidas de uso comum em solos agrícolas malaios, observaram que a dessorção de glifosato em solo arenoso, com CTC de 7,1 meq 100 g⁻¹ e pH 6,7, foi de 5,51% do aplicado, e em solo Muck, com CTC de 54,1 meq 100 g⁻¹ e pH 4,7, foi de 0,73%, mostrando em ambos os solos que a adsorção de glifosato não é permanente e que pode ocorrer lixiviação do herbicida ao longo do perfil. Citam, ainda, trabalho de Piccolo et al. (1994) que observaram dessorção da ordem de 15% a 80%.

Na solução do solo o glifosato dessorvido pode ser lixiviado assim como ser absorvido pelas plantas ou mineralizado pelos microrganismos do solo. No entanto, seu acúmulo no solo pode aumentar a meia-vida da mineralização. Como observado por Andréa et al. (2003) que, estudando a influência de repetidas aplicações de glifosato na sua persistência e na bioatividade do solo, notaram que com o aumento do número de aplicações de glifosato havia também aumento no tempo da meia-vida do glifosato extraível e do mineralizável (Tabela 5). Concluíram os autores que a menor biomineralização do glifosato com o aumento do número de aplicações indica efeito do herbicida sobre a atividade microbiana do solo. E, por conclusão, maior efeito residual.

Sprankle et al. (1975b) observaram que o nível de P no solo é o fator mais importante na previsão da quantidade adsorvida de glifosato.

À medida que se aumenta o teor de P no solo reduz-se a adsorção de glifosato (Tabela 6), cujo efeito pode ser avaliado através do menor crescimento de plantas de trigo (Tabela 7): no tratamento com glifosato sem P (controle) o peso seco da planta caiu de 29 mg para 1 e 9 mg, com 98 e 196 kg ha⁻¹ de P, respectivamente (SPRANKLE et al., 1975a).

Tabela 5. Meias-vidas (meses) de resíduos de ¹⁴C-glifosato extraível e mineralizado e seus coeficientes de correlação (R²) de ¹⁴C-glifosato aplicado em até quatro vezes no solo.

Número de aplicações	Extraível		Mineralizado	
	Meia-vida (mês)	R ²	Meia-vida (mês)	R ²
1	0,50	1,00	2,17	0,87
2	1,07	0,94	3,00	0,88
3	1,18	0,90	3,15	0,88
4	0,94	0,80	3,40	0,90

Fonte: ANDRÉA et al. (2003).

Tabela 6. Efeito do tipo de solo e do nível de P na adsorção de ¹⁴C-glifosato.

Solo	Argila (%)	P-solo (kg ha ⁻¹)	Adsorção de glifosato (nM g ⁻¹ de solo)
Spinks sandy loam	21,7	330	16,5
Conover sandy clay loam	29,7	76	27,3

Fonte: SPRANKLE et al. (1975b).

Tabela 7. Efeito do nível de P no solo na disponibilidade do glifosato aplicado em Spinks sandy loam, avaliado pelo peso seco de plantas de trigo com 16 dias de idade.

Fonte de fósforo	Dose de fósforo (kg ha ⁻¹)	pH do solo	Glifosato (kg ha ⁻¹)	
			0 (mg planta ⁻¹ PS)	56
Controle	0	5,7	50	29
KH ₂ PO ₄	98	5,4	51	11
KH ₂ PO ₄	196	5,4	51	9

Fonte: SPRANKLE et al. (1975a).

A adsorção de glifosato no solo é diminuída também pelo aumento do pH (SPRANKLE et al., 1975b; MILES e MOYE, 1988; McCONNEL e HOSSNER, 1985), sendo este efeito, no entanto, mais pronunciado em valores elevados de pH, fora da faixa ótima para a agricultura (Tabela 8).

Tabela 8. Redução da adsorção de glifosato com o aumento do pH.

Mineral	pH	Adsorção máxima (mmol kg ⁻¹)
Hematita	2,0	51,5
	4,5	37,3
	7,0	46,7
	11,5	29,6
Goetita	2,0	134,5
	4,5	96,4
	7,0	127,8
	11,5	21,8

Fonte: McCONNELL e HOSSNER (1985).

Em resumo, os solos com maiores probabilidades de apresentar toxidez com glifosato são: os arenosos, com baixa saturação por bases, com alto teor de P e baixa quantidade de matéria orgânica.

3. EFEITOS DO GLIFOSATO NAS PLANTAS: IMPLICAÇÕES FISIOLÓGICAS

3.1. No metabolismo secundário

A absorção e translocação do glifosato são influenciadas por diversos fatores, incluindo as características da planta, as condições ambientais, a concentração do herbicida, o surfatante utilizado e o método de aplicação. Os efeitos de tais fatores já foram extensivamente estudados e muitos dos resultados são encontrados nas revisões de Caseley e Coupland (1985) e Franz et al. (1997).

A absorção de glifosato é um processo que envolve uma rápida penetração inicial através da cutícula, seguida por uma absorção lenta. A difusão é considerada o principal processo de transporte do glifosato pela cutícula e, portanto, o gradiente de concentração entre a região de deposição e o interior da planta influencia a absorção (CASELEY e COUPLAND, 1985). A absorção do glifosato normalmente aumenta com a redução no volume de aplicação e aumento de sua concentração (STAHLMAN e PHILLIPS, 1979). A molécula do glifosato é altamente polar e apresenta baixa lipofilicidade, com um coeficiente de partição octanol-água (log K_{ow}) próximo a -4. Devido a estas características, é possível que a passagem do glifosato da superfície da folha para o apoplasto ocorra em função de um caminho aquoso ou hidrofílico, através da cutícula lipofílica (CASELEY e COUPLAND, 1985).

Os principais componentes químicos das ceras epicuticulares são os n-alcanos, ésteres, álcoois e ácidos graxos (BAKER, 1982). A cutícula é primariamente apolar, mas existem diferenças com relação ao grau de hidrofobicidade devido à sua composição. Essas diferenças podem refletir na absorção do glifosato, resultando em menor eficiência do produto quando a cutícula for mais hidrofóbica (CHACHALIS et al., 2001).

Após atingir o apoplasto, o glifosato é absorvido pelas células por um processo complexo, envolvendo mais de um mecanismo. Resultados obtidos por Hetherington et al. (1998) evidenciaram que quando o herbicida está em baixas concentrações no apoplasto, um mediador ativo é responsável por sua absorção, provavelmente um transportador, e em altas concentrações o processo predominante é a difusão.

Normalmente, o glifosato é rapidamente translocado pelas plantas. A principal via de translocação é simplástica, entretanto, significativo movimento apoplástico também ocorre. Vários trabalhos indicam que o glifosato segue a mesma rota dos produtos da fotossíntese (açúcares), indo das folhas fotossinteticamente ativas em direção às partes das plantas que utilizam estes açúcares, estabelecendo-se uma relação de fonte e dreno (CASELEY e COUPLAND, 1985).

O processo biossintético primário das plantas verdes é a fotossíntese na qual elas utilizam a energia solar para a produção de compostos orgânicos, agrupados pelas características comuns em metabólitos primários e secundários. Os metabólitos primários, essenciais para a sobrevivência dos organismos são: açúcares, aminoácidos, ácidos graxos, nucleotídeos e polímeros derivados deles. Grupo reduzido desses metabólitos serve como precursor para síntese de outros compostos em reações catalisadas enzimaticamente. Estes compostos são chamados de metabólitos se-

cundários: ácido chiquímico (precursor de vários compostos aromáticos), acetato (precursor de ácidos graxos, polifenóis, isoprenos, prostaglandinas, etc.) e aminoácidos alifáticos (biossíntese de alcalóides).

A Figura 4 mostra a rota biossintética para a produção dos metabólitos secundários (CASTRO et al., 2001; IRELAND, 1997).

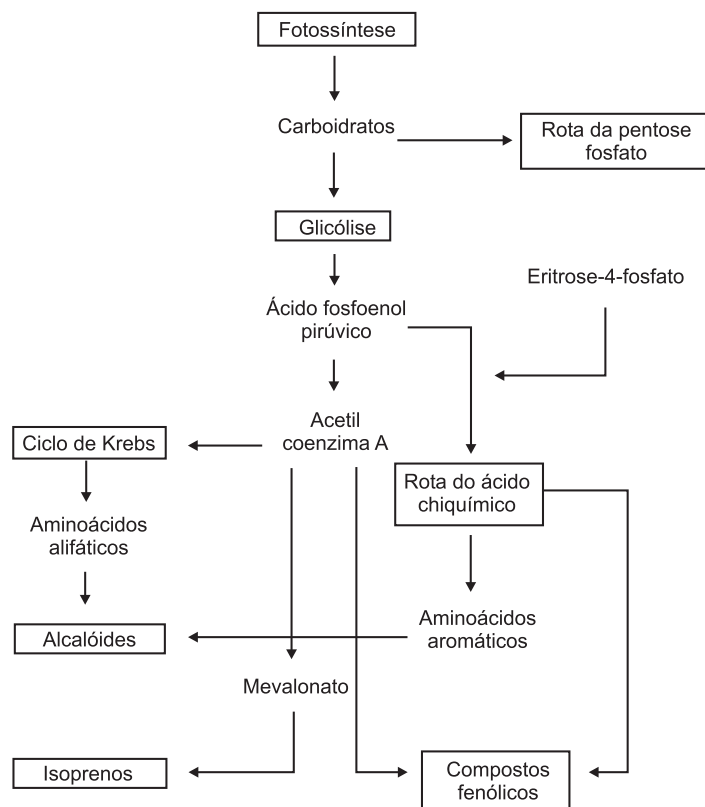


Figura 4. Esquema simplificado das rotas biossintéticas para produção de compostos fenólicos, isoprenóides e alcalóides.

Fonte: CASTRO et al. (2001a).

O glifosato é o mais importante herbicida a afetar a síntese de metabólitos secundários devido ao bloqueio da rota do ácido chiquímico, com muitas implicações ecológicas (LYDON e DUKE, 1988). Entre os efeitos, podem ser citados: síntese de IAA e de outros hormônios vegetais, síntese de clorofila, síntese de fitoalexinas e de lignina, síntese de proteínas, fotossíntese, respiração, transpiração, permeabilidade de membranas e outros mais.

A inibição da enzima EPSPs afeta a via metabólica do chiquimato, que é responsável pela produção dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina e triptofano. Vários trabalhos demonstraram que plantas tratadas com glifosato tornam-se deficientes destes três aminoácidos aromáticos, sendo que a adição exógena destes metabólitos reverte a intoxicação (FRANZ et al., 1997). Estes três aminoácidos, além de serem necessários para a síntese protéica, servem de substrato para a produção de muitos outros compostos secundários, que, conseqüentemente, podem ser afetados quando a planta é atingida pelo glifosato (COLE, 1985; GRUYS e SIKORSKI, 1999; HAHNBROCK e SCHEEL, 1989; WHETTEN e SEDEROFF, 1995).

Uma série de estudos demonstraram que a inibição da enzima EPSPs pelo glifosato interfere no controle da entrada de carbono na rota do chiquimato pelo aumento da atividade da enzima 3-deoxi-D-arabino-heptulosonato-7-fosfato sintase (DAHPS), que catalisa a

condensação de eritrose-4-fosfato com PEP, e é considerada enzima reguladora da rota (DEVINE et al., 1993). O aumento da atividade da DAHPS aparentemente ocorre devido aos baixos níveis de arogenato, que é um inibidor alostérico da DAHPS e é um composto posterior à EPSP na rota do chiquimato. Com a redução da inibição por arogenato, DAHPS continua atuando, o que provoca acúmulo de altos níveis de chiquimato, já que a rota é interrompida pela inibição da EPSPs. A quantidade de chiquimato que é acumulada pela desregulação da rota representa um forte dreno de carbono do ciclo de Calvin, pelo desvio de eritrose-4-fosfato, que seria empregado na regeneração de ribulose bifosfato. Isto representa um efeito importante da inibição da rota pelo glifosato, que reduz drasticamente a produção fotossintética (GEIGER et al., 1986; GEIGER et al., 1987; SERVIATES et al., 1987; SHIEH et al., 1991).

A inibição da EPSPs pelo glifosato causa o bloqueio da síntese dos aminoácidos aromáticos e dos fenóis derivados desses aminoácidos (DEVINE et al., 1993). Relatos sobre os efeitos na síntese de fenóis específicos são numerosos, sendo que uma revisão detalhada foi realizada por Duke e Hoagland (1985). Os resultados indicam que o glifosato pode aumentar a atividade da fenilalanina amônia-liase (PAL), concomitantemente com o decréscimo na concentração de fenóis secundários, provavelmente devido a uma redução no controle da inibição da PAL (COLE et al., 1980). Assim, além de exaurir o *pool* de aminoácidos aromáticos, os níveis tóxicos de produtos da atividade da PAL, que são os íons amônio e cinamato (e seus derivados) podem exacerbar os processos metabólicos da célula vegetal com a elevada atividade da PAL (DUKE e HOAGLAND, 1985).

O acúmulo de chiquimato causado pela inibição da EPSPs e a desregulação da rota do chiquimato resulta no aumento de certos ácidos hidroxibenzóicos que aparentemente derivam diretamente do chiquimato (BECERRIL et al., 1989; CAÑAL et al., 1987; LYDON e DUKE, 1988). Segundo Devine et al. (1993), o efeito relativo no conteúdo de ácidos benzóicos é muito maior que o efeito no conteúdo de fenóis derivados dos aminoácidos aromáticos. Uma razão para a redução no conteúdo de fenóis derivados de aminoácidos aromáticos ser menor do que o esperado é que a rota metabólica tem acesso aos aminoácidos aromáticos provenientes da degradação de proteínas e das reservas em vacúolos, assim como aos aminoácidos recém formados (WANG, 2001).

Em doses subletais de glifosato, os efeitos na concentração de fenóis em tecidos exportadores de carboidratos podem ser transitórios. Entretanto, os efeitos podem manter-se pronunciados em órgãos-drenos, como frutos e flores (BECERRIL et al., 1989). Isto ocorre em função do glifosato ser muito móvel no floema, acumulando-se nos órgãos-dreno (CASELEY e COUPLAND, 1985). Em função destas constatações, pode-se considerar que os efeitos nos compostos secundários podem ocorrer somente na presença do herbicida. Na literatura podem ser encontrados muitos efeitos secundários causados pelo glifosato e estes variam em função da vários fatores, tais como dose, espécie e estágio de desenvolvimento da planta. A seguir, serão apresentados alguns dos efeitos mais relatados na literatura.

3.2. Na síntese de ácido indolilacético (IAA)

Na planta, o promotor de crescimento, a auxina ácido indolilacético (IAA), deriva do aminoácido triptofano através de várias etapas, envolvendo indolpiruvato ou triptamina ou indoletanol para dar indolilacetaldeído, ou glucobrassicina, para dar indolilacetoneitrilo, compostos precursores do IAA. A biossíntese de IAA é inibida pela ação do glifosato. Isto se verifica porque já se encontra

bem estabelecido que glifosato inibe a síntese de corimato e de triptofano. A biossíntese de IAA em plantas e bactérias é apresentada na Figura 5. Nela verifica-se a possibilidade da ocorrência de quatro rotas de síntese: a rota do ácido indol 3-pirúvico, a rota bacteriana, a rota indol-3-acetonitrila (IAN) e a rota da triptamina (TAM).

A biossíntese de IAA independente do triptofano tem como precursor o indol-3-glicerol fosfato, que por sua vez depende de corimato para sua formação. Como a síntese de corimato também é inibida pelo glifosato, pode-se dizer que a biossíntese de IAA independente do triptofano também pode ser inibida pelo herbicida. Ou seja, o glifosato bloqueia totalmente a síntese de IAA.

Foi demonstrado que o glifosato exerce uma rápida redução no conteúdo de auxina nas plantas através da formação de conjugados e pela degradação oxidativa de IAA. Calos de tabaco pré-tratados com $2 \times 10^{-4} \text{ mol L}^{-1}$ de glifosato mostraram um aumento na habilidade de oxidar ^{14}C -IAA, aplicado em seguida (LEE, 1982a), resultando em níveis muito menores de ^{14}C -IAA nos calos tratados (Figura 6) e não o oposto, como citam Galli e Montezuma (2005). De acordo com Lee (1982b), o aumento no metabolismo seria causado pelo incremento na atividade da IAA-oxidase. Como se sabe, alguns compostos fenólicos são inibidores de IAA-oxidase. No entanto, como a síntese destes compostos fenólicos é inibida pela ação do glifosato, haverá então aumento da atividade da IAA oxidase, o que levará a um aumento na oxidação do IAA e, conseqüentemente, menor nível de IAA livre.

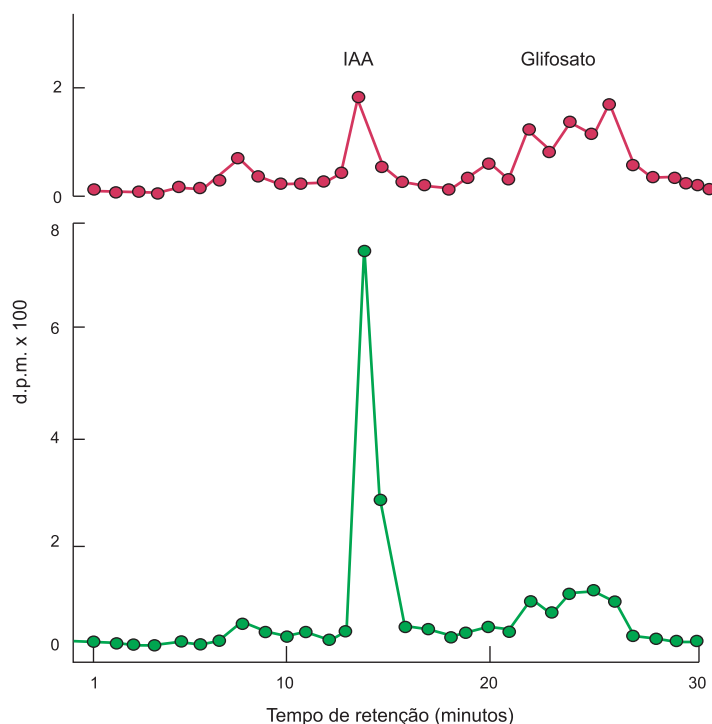


Figura 6. Níveis de $[2-^{14}\text{C}]$ IAA livre em calos de tabaco pré-tratados com glifosato e no controle.

Fonte: LEE (1982a).

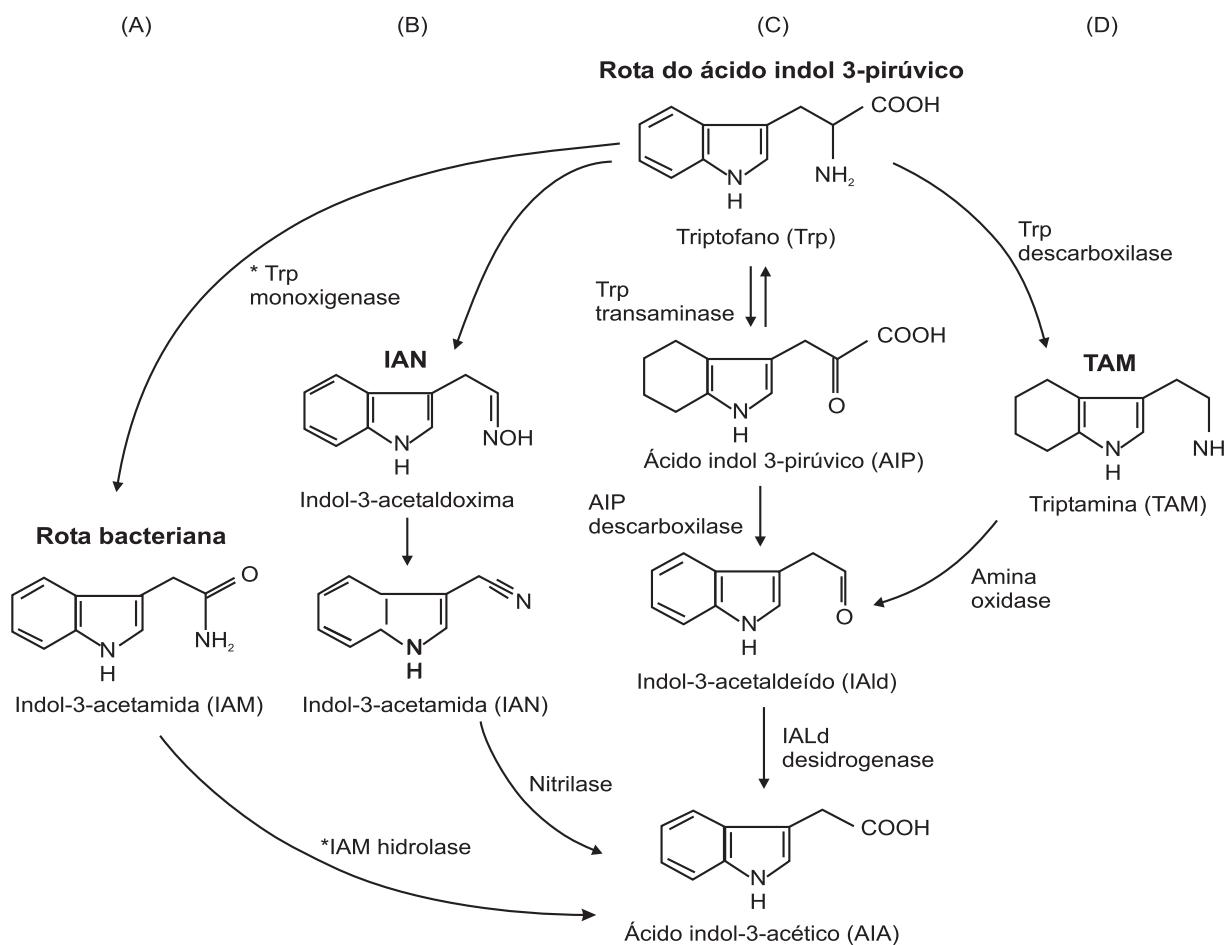


Figura 5. Rotas da biossíntese de IAA dependentes do triptofano em vegetais e bactérias. As enzimas que estão presentes somente em bactérias estão marcadas com um asterisco.

Fonte: BARTEL (1997), citado por TAIZ e ZEIGER (2004).

Esta menor produção de IAA poderia explicar os sintomas de seca de ponteiro (dieback) e o menor desenvolvimento da parte aérea observados em cafezais e pomares cítricos manejados com glifosato. E também de raízes, como será discutido mais adiante.

A produção e o transporte de auxina são restringidos por doses subletais de glifosato. Baur (1979) demonstrou que a exposição ao glifosato causou uma inibição do movimento basípeto do ^{14}C -IAA a partir do bloco de ágar doador localizado no ápice cortado de milho. Além disso, uma acumulação do composto marcado ocorreu na extremidade basal do segmento, o que, juntamente com a falta de difusão do marcador para o interior do bloco receptor localizado na extremidade basal, indicam ligação do IAA no interior do tecido.

Outro importante promotor de crescimento das plantas é a giberelina. A biossíntese desse hormônio vegetal origina-se do 3 acetil CoA, passando por ácido mevalônico, geranilgeranil pirofosfato e caureno, dentre outros componentes da via metabólica. A auxina (IAA) promove a biossíntese de giberelina (Figura 7).

Se plantas de ervilha são decapitadas, ocasionando interrupção no alongamento do caule, não é somente o nível de auxina que é reduzido, pois sua fonte foi removida, mas também o teor de GA_1 diminui drasticamente na parte superior do caule. A reposição da gema com suprimento de auxina restaura o nível de GA_1 . A gema apical promove o crescimento tanto através da biossíntese direta da auxina quanto da biossíntese de GA_1 induzida pela auxina (ROSS e O'NEIL, 2001). Dois papéis importantes do IAA serão discutidos a seguir.

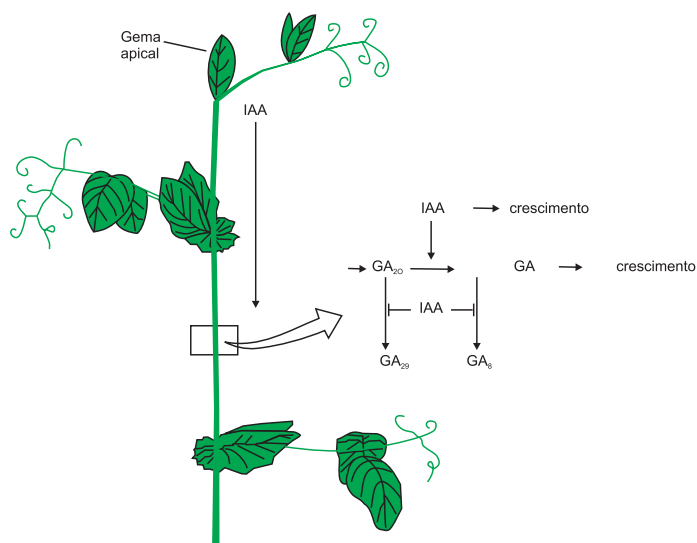


Figura 7. O IAA (da gema apical) promove e é necessário para a biossíntese do GA_1 nos entrenós inferiores. O IAA também inibe a degradação da GA_1 .
Fonte: ROSS e O'NEIL (2001).

3.2.1. Efeitos de biorreguladores na diferenciação cambial

Quando IAA é aplicado em brotações de espécies arbóreas, a divisão cambial é estimulada e os derivativos cambiais se diferenciam para produzir tecido de xilema. Quando GA é aplicada, ocorre divisão cambial, mas os derivativos resultantes no lado xilemático do câmbio permanecem indiferenciados. Os teores de IAA e GA aplicados são importantes na determinação de qual tecido será produzido: se de xilema ou se de floema. Teores altos de IAA e baixos de GA favorecem a formação de xilema, enquanto teores baixos de IAA e altos de GA favorecem a produção de floema. O

novo tecido de floema produzido como resultado do tratamento hormonal é completamente diferenciado, contendo elementos crivados e placas crivadas. IAA é importante para promover a alongação dos derivativos cambiais para produzir vasos de xilema e elementos fibrosos, sendo que, no caso das fibras do xilema, a aplicação de GA promove alongação das mesmas. IAA é um importante fator no estabelecimento do diâmetro dos vasos em *Robinia pseudacacia*: altos níveis de IAA aplicados produzem vasos do tipo primavera e baixos níveis produzem vasos estreitos de verão (DIGBY e WAREING, 1966).

3.2.2. Auxina o gravitropismo radicular

O IAA mostra-se necessário em concentrações de 10^{-10} M para promover o crescimento das raízes. Sabe-se que o glifosato inibe a síntese de IAA. O gravitropismo (crescimento em direção ao centro da terra) das raízes requer a presença de IAA na coifa. O início da curvatura de raízes dispostas horizontalmente está positivamente correlacionado com o desenvolvimento de um fluxo ácido assimétrico na zona de alongamento. A indução artificial da assimetria do IAA na zona de alongamento induz curvatura semelhante ao gravitropismo. Esses resultados, tomados em conjunto, sugerem fortemente que o IAA desempenha uma função importante na gravicurvatura das raízes (MOORE e EVANS, 1986).

Aplicação assimétrica de cálcio em pontas de raízes faz com que raízes orientadas verticalmente curvem-se em direção à fonte de cálcio. Tratamento de pontas de raízes com EDTA (quelante de cálcio) elimina a resposta das raízes ao gravitropismo, sendo que este é restaurado quando EDTA é substituído por cálcio trocável (LEE et al., 1983). Sabe-se que o glifosato pode também complexar o cálcio. Existe um movimento preferencial de cálcio, através da coifa da raiz, quando as mesmas se encontram na posição horizontal. Inibidores do transporte de auxina (TIBA, NPA) bloqueiam o transporte de cálcio na coifa e inibem a gravicurvatura. Esses resultados indicam que o cálcio move-se a partir da coifa de raízes horizontalmente orientadas, sendo que se acumula no lado inferior da coifa, e que esse acúmulo assimétrico de cálcio resulta na gravicurvatura (Figura 8).

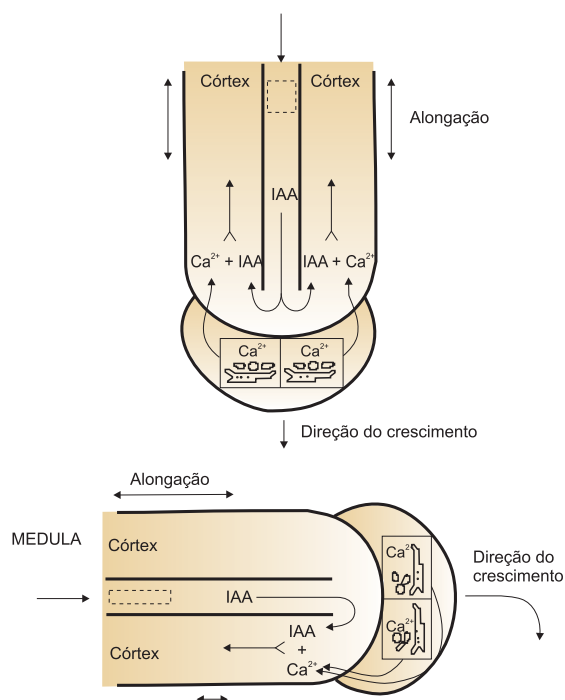


Figura 8. Modelo de Evans-Moore para o gravitropismo.

3.3. Na síntese de etileno

Na biossíntese de aminoácidos e ureídeos verifica-se que a via se ramifica em síntese de triptofano, fenilalanina e tirosina (inibida pela presença de glifosato) ou em síntese de glicina, serina, cisteína e metionina. Essa segunda ramificação deve ser mais induzida quando a primeira é inibida. Nela nota-se a presença de metionina, precursora da síntese de etileno (Figura 9).

Abu-Irmaileh et al. (1979) observaram que a aplicação de solução com 20 mM do sal de isopropilamônio de glifosato em plantas de feijoeiro aumentou a produção de etileno (Figura 10) e de celulase (Figura 11). O etileno pode inibir o metabolismo de fosfolipídeos, aumentar a permeabilidade da membrana, causar perda de clorofila, aumentar o desverdecimento, inibir a divisão e expansão celular, reduzir a síntese de DNA e aumentar a atividade da celulase nas zonas de abscisão. O aumento da atividade de celulase pode diminuir a resistência às abscisões.

Gravena (2006) observou que em frutos maduros de citros houve significativo aumento na produção de etileno devido ao glifosato. A quantidade de etileno liberada pelos frutos maduros atingidos pelo glifosato foi bastante desuniforme. Enquanto alguns frutos dobraram sua produção de etileno, outros mantiveram produção semelhante à do controle. Essa variação na produção de etileno pode estar correlacionada com o fato da queda de frutos ser desuniforme ao longo do tempo. A abscisão dos frutos atingidos pelo glifosato iniciou-se aos 5 dias após a aplicação (DAA), quando

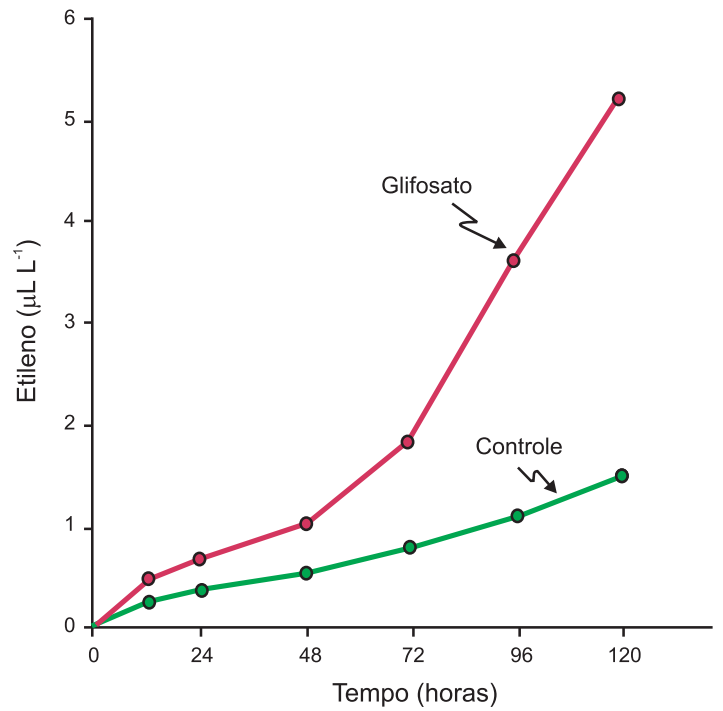


Figura 10. Efeito de 20 mM do sal isopropilamina de glifosato (pH 7) na produção de etileno por feijoeiro 'Red Kidney'.
Fonte: ABU-IRMAILEH et al. (1979).

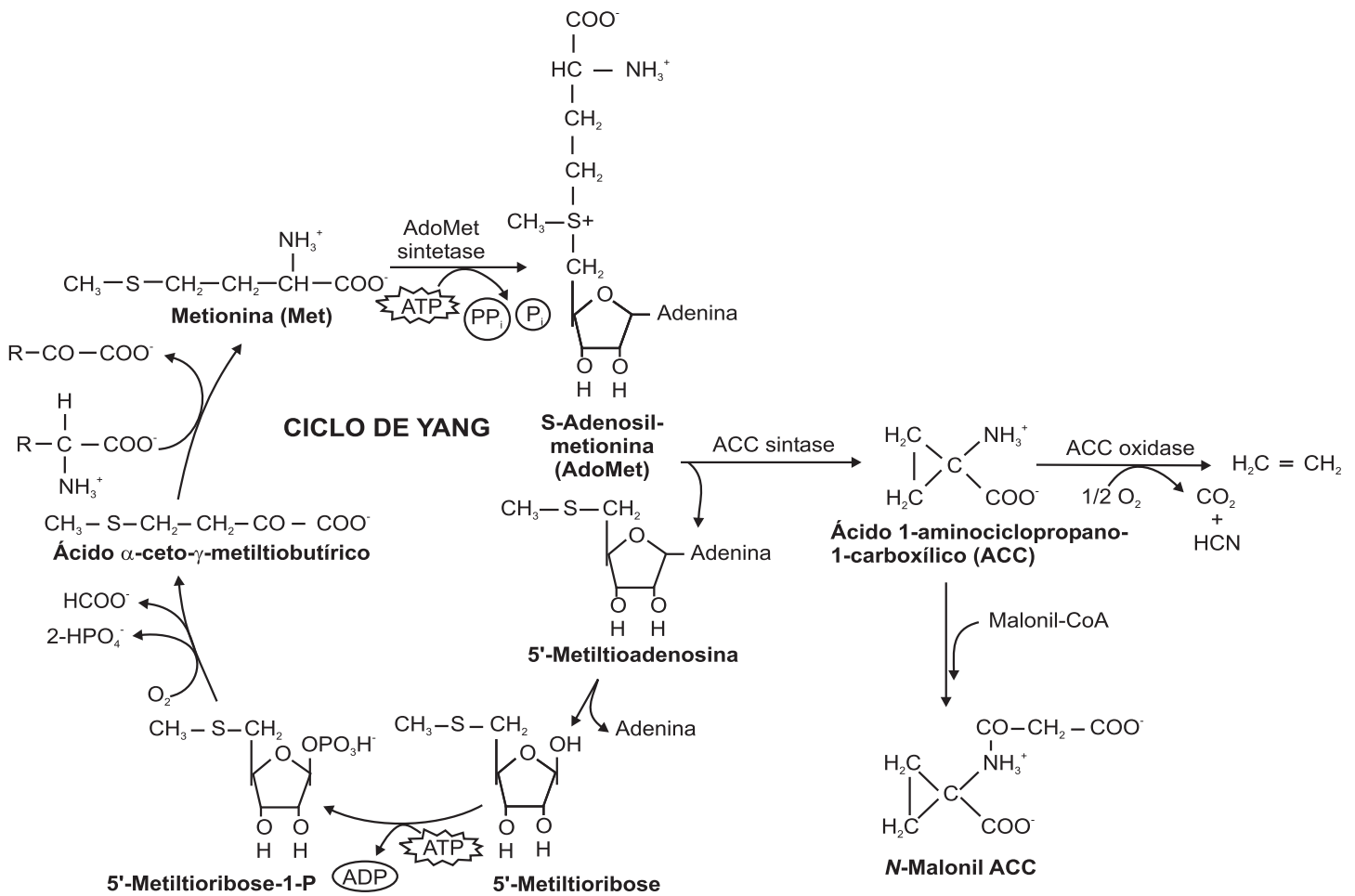


Figura 9. Rota biossintética do etileno e o ciclo de Yang.
Fonte: McKEON et al. (1995).

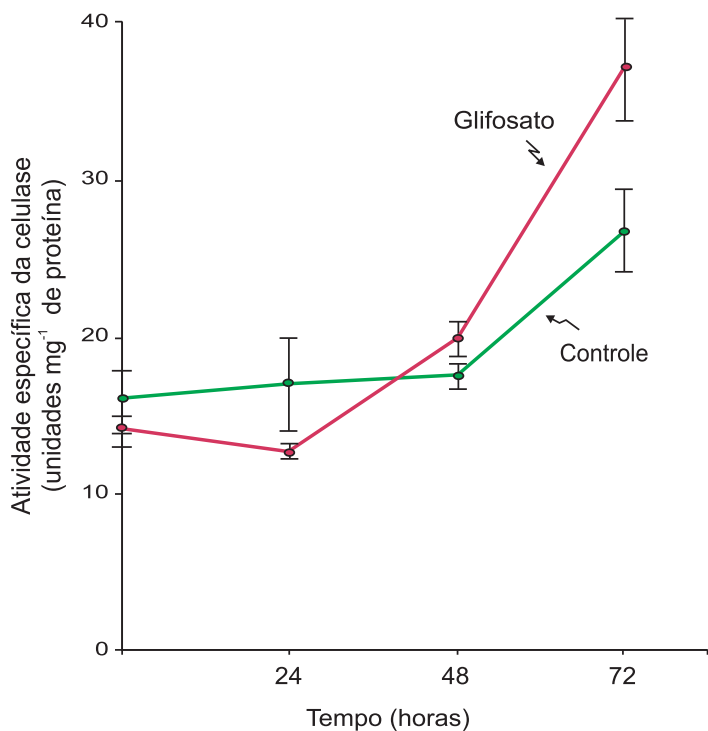


Figura 11. Efeito de 20 mM do sal isopropilamina de glifosato na atividade específica da celulase nas zonas de abscisão de feijoeiro 'Red Kidney'.

Fonte: ABU-IRMAILEH et al. (1979).

ainda não havia sintomas visuais de dano na casca e durou até cerca de 30 DAA. Nos dois experimentos anteriores os frutos caíram em um intervalo maior que 20 dias (principalmente entre 15 e 35 DAA) e nem todos os que foram atingidos pelo glifosato sofreram abscisão.

A abscisão foliar, de acordo com Osborne (1973), citado por Kozłowski (1978), é um fenômeno que envolve três estágios se-

qüenciais: estímulo, sinal e resposta. Enquanto a folha continuar exportando auxina não ocorre abscisão. Contudo, quando ela senesce, a produção e a translocação de auxina pela zona de abscisão são reduzidas. Concomitantemente, a produção de etileno é aumentada e inicia-se o processo de abscisão. A abscisão foliar normal pode ser atrasada pela auxina ou citocinina exógena. E é altamente estimulada por concentrações de etileno no ar tão baixa como 0,1 $\mu\text{L L}^{-1}$ ou por aplicações de ethephon (ácido 2-cloroetilfosfônico) que é convertido a etileno.

3.4. Na síntese de compostos fenólicos

As plantas produzem uma grande variedade de produtos secundários que contêm um grupo fenol – um grupo hidroxila funcional em um anel aromático. Tais substâncias são classificadas como compostos fenólicos. Os fenóis vegetais constituem um grupo quimicamente heterogêneo, com aproximadamente 10.000 compostos: alguns são solúveis apenas em solventes orgânicos, outros são ácidos carboxílicos e glicosídeos solúveis em água e há, ainda, aqueles que são grandes polímeros insolúveis. Devido à sua diversidade química, os compostos fenólicos apresentam uma variedade de funções nos vegetais. Muitos agem como compostos de defesa contra herbívoros e patógenos. Outros têm função no suporte mecânico, como atrativos de polinizadores ou dispersores de frutos, na proteção contra a radiação ultravioleta ou reduzindo o crescimento de plantas competidoras adjacentes (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Os compostos fenólicos são biossintetizados por meio de diferentes rotas, razão pela qual constituem um grupo bastante heterogêneo do ponto de vista metabólico. Duas rotas metabólicas básicas estão envolvidas na síntese dos compostos fenólicos: a rota do ácido chiquímico e a rota do ácido malônico (Figura 12). A rota do ácido chiquímico participa na biossíntese da maioria dos fenóis vegetais das plantas superiores. A rota do ácido malônico, embora seja uma fonte importante de produtos secundários fenólicos em fungos e bactérias, é menos significativa nas plantas superiores.

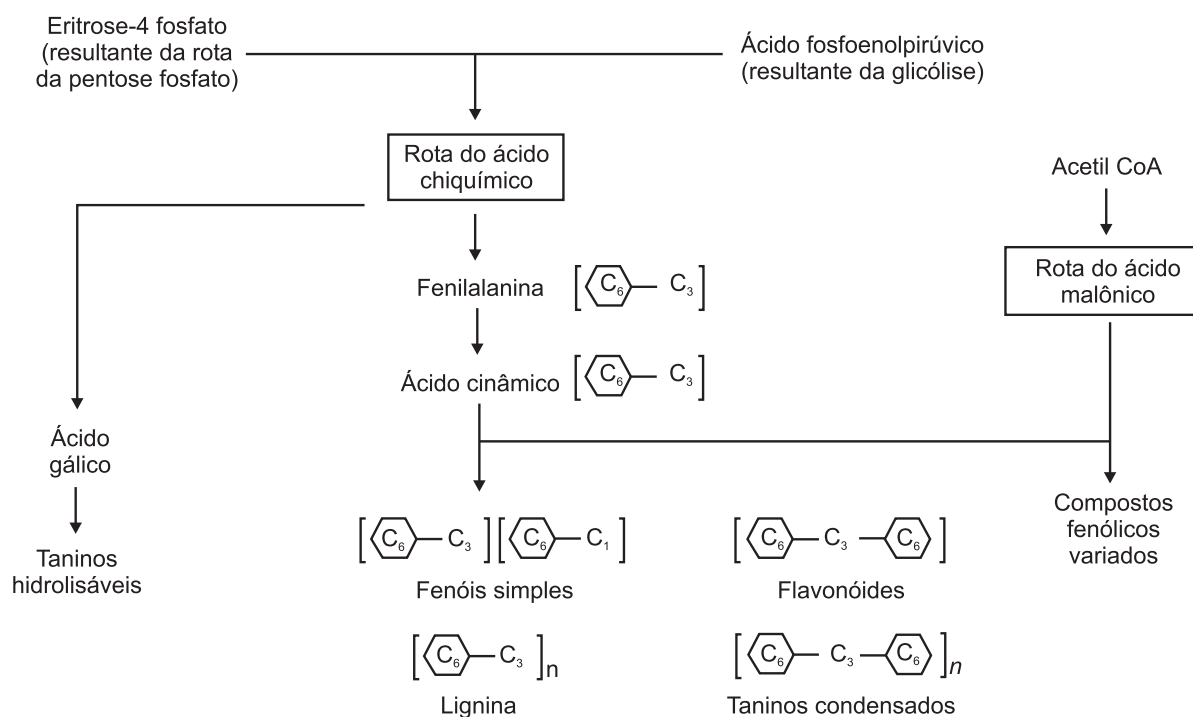


Figura 12. Na biossíntese dos fenóis, a rota do ácido chiquímico é predominante para plantas superiores e a rota do ácido malônico é para fungos e bactérias.

Fonte: TAIZ e ZEIGER (2004).

A rota do ácido chiquímico converte precursores de carboidratos derivados da glicólise e da rota da pentose fosfato em aminoácidos aromáticos. Um dos intermediários dessa rota é o ácido chiquímico, que dá o nome a essa seqüência de reações. O glifosato mata os vegetais por bloquear uma etapa desta rota metabólica – a passagem de chiquimato para corismato.

A classe mais abundante de compostos fenólicos secundários em plantas é derivada da fenilalanina, por meio da eliminação de uma molécula de amônia para formar o ácido cinâmico. Essa reação é catalisada pela fenilalanina amonialiase (PAL), situada em um ponto de ramificação entre os metabolismos primário e secundário (Figura 13), de forma que a reação que ela catalisa é uma etapa reguladora importante na formação de muitos compostos fenólicos (TAIZ e ZEIGER, 2004).

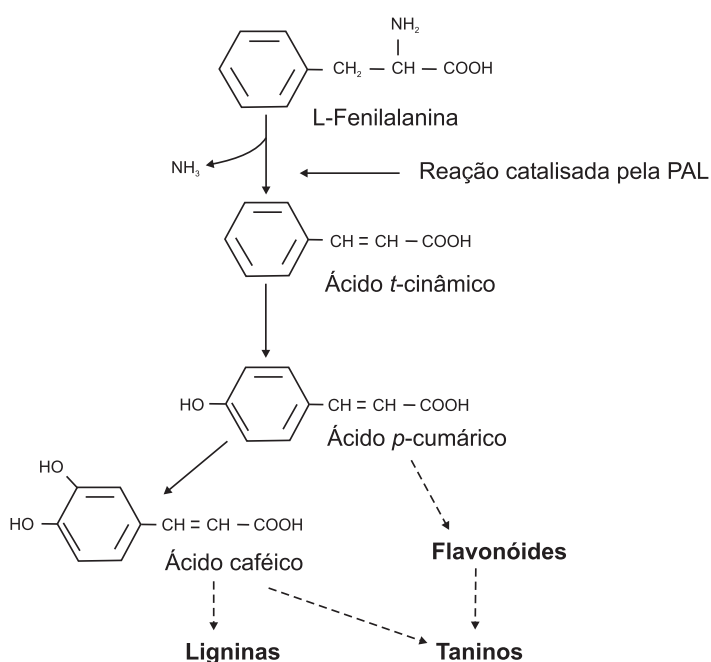


Figura 13. Rota dos compostos fenólicos secundários controlada pela PAL. Fonte: DUKE e HOAGLAND (1985).

As reações subseqüentes àquelas catalisadas pela PAL levam à adição de mais grupos hidroxila e outros substituintes. Os ácidos *trans*-cinâmico e *p*-cumárico e seus derivados são compostos fenólicos simples chamados fenilpropanóides, por conterem um anel benzênico e uma cadeia lateral de três carbonos. Os fenilpropanóides são importantes unidades básicas para a formação de compostos fenólicos mais complexos (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Os compostos fenólicos simples são amplamente distribuídos nas plantas vasculares e parecem apresentar diferentes funções. Suas estruturas incluem:

(a) Fenilpropanóides simples, tais como ácido *trans*-cinâmico, ácido *p*-cumárico e seus derivados, como o ácido caféico, os quais apresentam um esqueleto básico de fenilpropanóide.

(b) Lactonas de fenilpropanóides (ésteres cíclicos) chamadas cumarinas, também com esqueleto de fenilpropanóide.

(c) Derivados do ácido benzóico, os quais apresentam um esqueleto formado a partir de fenilpropanóides pela eliminação de dois carbonos da cadeia lateral.

Os vegetais podem modificar os esqueletos carbônicos básicos de compostos fenólicos simples para formar produtos mais

complexos da mesma forma como fazem com outros produtos secundários. Muitos compostos fenólicos simples apresentam funções importantes nos vegetais, agindo como compostos de defesa contra insetos herbívoros e fungos. Atenção especial tem sido dada à fitotoxicidade de certas cumarinas, as furanocumarinas, que apresentam um anel furano (TAIZ e ZEIGER, 2004). Alguns dos compostos fenólicos de importância para as plantas são discutidos a seguir.

3.4.1. Lignina

Depois da celulose, a substância orgânica mais abundante nas plantas é a lignina, um polímero de grupos fenilpropanóides altamente ramificado que apresenta funções primária e secundária. A estrutura precisa da lignina não é conhecida devido à dificuldade de se extrair lignina das plantas, pois está covalentemente ligada à celulose e a outros polissacarídeos da parede celular.

A lignina é encontrada nas paredes celulares de vários tipos de tecidos de sustentação e vascular, especialmente em traqueídeos e elementos de vaso. Ela é depositada sobretudo no espessamento da parede secundária, mas também pode ocorrer na parede primária e na lamela média, em íntimo contato com a celulose e hemicelulose já presentes. A rigidez mecânica da lignina fortalece os caules e o tecido vascular, permitindo o crescimento ascendente e possibilitando que a água e os sais minerais sejam conduzidos através do xilema sob pressão negativa, sem haver o colapso do tecido. Uma vez que a lignina é um componente-chave do tecido de transporte de água, a capacidade de produzir lignina deve ter sido uma das adaptações mais importantes, que permitiu que as plantas colonizassem o ambiente terrestre.

Além de proporcionar suporte mecânico, a lignina desempenha funções protetoras importantes nos vegetais. Sua resistência física coíbe seu consumo pelos herbívoros e sua estabilidade química torna-a relativamente indigerível por esses organismos. Por sua capacidade de ligação à celulose e às proteínas, a lignina também reduz a digestibilidade dessas substâncias. A lignificação bloqueia o crescimento de patógenos e é uma resposta freqüente à infecção ou à lesão (TAIZ e ZEIGER, 2004).

Assim, Meschede et al. (2007a), analisando os teores de lignina e celulose em amostras de *Brachiaria decumbens* submetidas a subdoses de glifosato, observaram diminuição para perto de 50% nos níveis originais de lignina a partir de 30 dias após a aplicação do produto, em dose tão pequena como 20 mL ha⁻¹ (Tabela 9). Apesar da diminuição de lignina constituir uma melhoria na digestibilidade da *Brachiaria decumbens* é importante lembrar também que esta mesma diminuição no conteúdo de lignina pode tornar também a planta mais suscetível às doenças e ao acamamento.

Também na cana-de-açúcar, Meschede et al. (2007c) observaram uma redução de 30% no nível de lignina 30 dias após a aplicação de 400 mL de glifosato por hectare como maturador, que caiu de 3,75%, na testemunha, para 1,95%, no tratamento com glifosato.

3.4.2. Flavonóides

Constituem a maior classe de fenólicos vegetais. O esqueleto de carbono dos flavonóides contém 15 carbonos organizados em dois anéis aromáticos, ligados por uma cadeia de três carbonos. Esta estrutura é resultante de duas rotas biossintéticas separadas: a rota do ácido chiquímico e a rota do ácido malônico. Os flavonóides são classificados em grupos diferentes, primeiramente pelo grau de oxidação da cadeia de três carbonos. Dentre os principais flavo-

Tabela 9. Conteúdo de lignina em *Brachiaria decumbens* aos 30 e 60 dias após a aplicação de glifosato. Botucatu, SP, 2007.

Tratamento	Dias após a aplicação	
	30	60
(mL ha ⁻¹)	----- (%) -----	
20	13,70 ab	14,40 ab
40	13,35 b	15,60 b
80	13,78 b	14,00 b
160	13,27 b	13,10 b
320	24,23 a	24,96 a
Testemunha	24,54 a	26,11 a
F Tratamento	3,22*	3,63*
F Bloco	1,81 ns	1,53 ns
C.V. (%)	14,25	20,42
D.M.S.	8,20	11,70

Fonte: MESCHEDE et al. (2007a).

nóides estão as antocianinas, as flavonas, os flavonóis e as iso-flavonas. Os esqueletos de carbono dos flavonóides podem ter vários substituintes. Os grupos hidroxila estão normalmente presentes nas posições 4, 5 e 7, mas também podem ser encontrados em outras posições. Os açúcares são também muito comuns; de fato, a maioria dos flavonóides ocorre naturalmente com glicosídeos. Enquanto os grupos hidroxila e açúcares aumentam a solubilidade em água dos flavonóides, outros substituintes, tais como éteres metílicos ou unidades isopentil modificadas, tornam os flavonóides lipofílicos (hidrofóbicos). Os tipos diferentes de flavonóides desempenham funções diversas nos vegetais, incluindo pigmentação e defesa, esta última através das fitoalexinas (TAIZ e ZEIGER, 2004).

3.4.3. Fitoalexinas

São definidas como compostos antimicrobianos de baixo peso molecular, sintetizados através da rota do ácido chiquímico e acumulados nas plantas após exposição aos microrganismos. Apesar de não se conhecer o seu exato mecanismo, são compostos importantes na defesa da planta contra ataques de bactérias, fungos, nematóides e insetos (PAXTON, 2000). Estruturas químicas de algumas fitoalexinas são mostradas na Figura 14.

As fitoalexinas acumulam-se em torno do local da infecção e apresentam atividade antimicrobiana. Em geral, elas não estão presentes nas plantas antes da infecção, mas são sintetizadas muito rapidamente, após o ataque de microrganismos, pelas células sadias adjacentes às células danificadas ou necróticas em resposta a materiais que se difundem destas últimas. A resistência ocorre quando uma ou mais fitoalexinas atingem concentração suficiente para restringir o desenvolvi-

mento do patógeno. No entanto, fitoalexinas não são produzidas durante as infecções biotróficas compatíveis, devido a supressores moleculares produzidos pelos patógenos (AGRIOS, 1997; TAIZ e ZEIGER, 2004).

É interessante observar que tanto o glifosato como o patógeno inibem a síntese de fitoalexinas – o primeiro através do bloqueio da rota do chiquimato e o segundo através da supressão da atividade da PAL-fenilalanina amonialiase (AGRIOS, 1997).

3.4.4. Antocianinas, flavonas e flavonóis

As antocianinas, as flavonas e os flavonóis são responsáveis por muitas cores observadas nas plantas. As antocianinas servem de atrativos para polinizadores e dispersores de sementes, sendo que flavonas e flavonóis não são visíveis ao olho humano, mas são sinais atrativos para abelhas.

3.4.5. Taninos condensados

São compostos formados pela polimerização de unidades de flavonóides. Normalmente, são constituintes de plantas lenhosas. Como os taninos condensados podem frequentemente ser hidrolisados a antocianidinas por tratamento com ácidos fortes, eles muitas vezes são denominados de pró-antocianidinas, que são antocianinas sem seus açúcares (TAIZ e ZEIGER, 2004).

3.5. Na síntese de aminoácidos e de proteínas

Efeitos do glifosato reduzindo os níveis de fenilalanina e tirosina em tecidos de plantas de soja, milho, algodoeiro e trigo

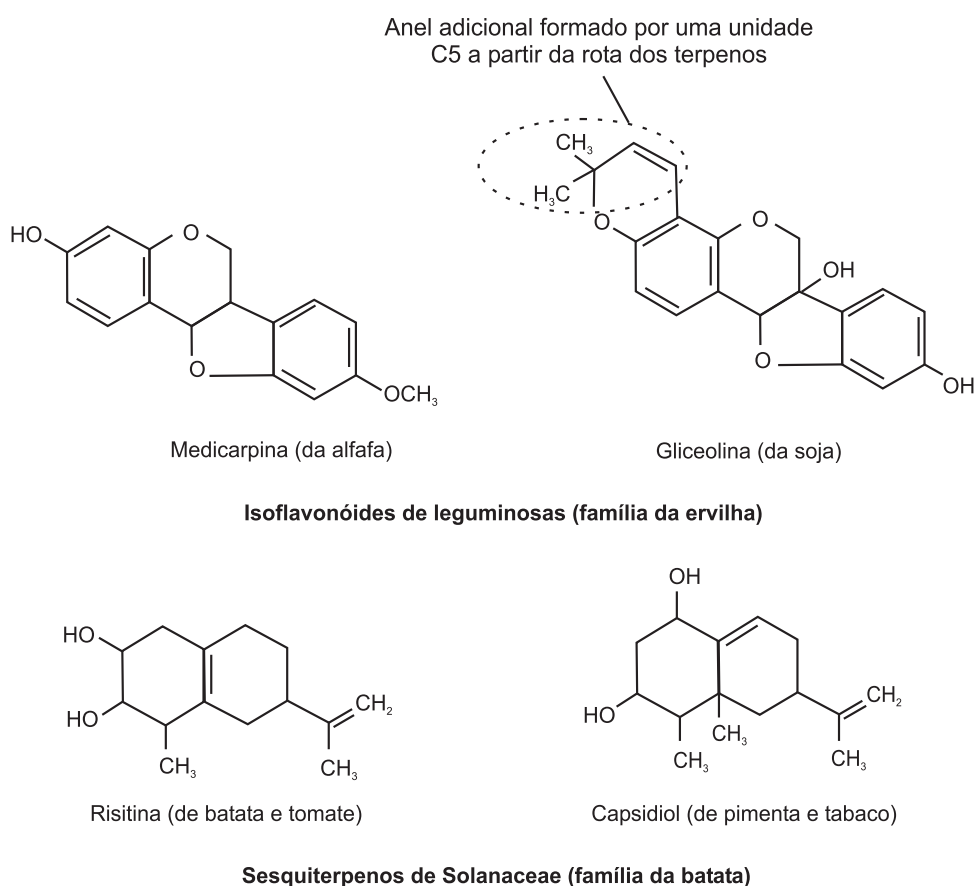


Figura 14. Estrutura de algumas fitoalexinas – metabólitos secundários com propriedades antimicrobianas, que são rapidamente sintetizados após a infecção por microrganismo.

Fonte: TAIZ e ZEIGER (2004).

Tabela 10. Efeitos do glifosato nos *pools* livres de aminoácidos aromáticos em quatro espécies vegetais.

Espécie	Tecido	Concentração de glifosato (mmol L ⁻¹)	Fenilalanina		Tirosina	
			Controle	Tratamento	Controle	Tratamento
			----- (nmol g ⁻¹ peso fresco) -----			
Soja	Raiz	0,5	369	168	117	69
Milho	Raiz	1,0	128	77	171	88
Algodoeiro	Raiz	0,2	307	173	125	149
Trigo mourisco	Hipocótilo	1,0	44	20	59	76

Fonte: DUKE e HOAGLAND (1985).

mourisco são apresentados na Tabela 10, de Duke e Hoagland (1985). Aliás, fenômeno constatado por Jaworski (1972) quando estudou o efeito do glifosato em *Lemna gibba*, uma planta aquática.

Apesar da redução nos teores de fenilalanina e tirosina, observou-se aumento na quantidade total de aminoácidos livres, principalmente glutamato e glutamina, e redução no teor de proteína. Esta redução seria devido à diminuição no *pool* de fenilalanina, precursora da síntese protéica (COLE, 1985). Tymonko (1978), citado por Cole (1985), observou que havia aumento no total de aminoácidos livres em células isoladas de folhas de soja, e que este aumento era simultâneo com o declínio em proteína solúvel, mas precedido pela redução de fenilalanina e tirosina livres.

Em citros, como consequência da ação do glifosato evidenciada pelo acúmulo de chiquimato, os teores de aminoácidos foram menores nas folhas das plantas tratadas, logo aos 2 DAA, independentemente da dose do herbicida (GRAVENA, 2006). Provavelmente houve redução na produção dos aminoácidos aromáticos fenilalanina, triptofano e tirosina devido à interrupção da rota metabólica do chiquimato (DUKE e HOAGLAND, 1985; HOLLÄNDER e AMRHEIN, 1980; JAWORSKI, 1972).

3.6. Na ultraestrutura celular

Poucos trabalhos foram realizados com glifosato para verificar seus efeitos na ultraestrutura das plantas. Nessas pesquisas, somente foram estudados seus efeitos nas folhas de plantas desenvolvidas. Apesar do glifosato causar clorose e necrose foliar, o herbicida se move e se acumula mais no meristema apical do que nas folhas. Na pesquisa realizada, foi descrita a ultraestrutura das folhas e raízes primárias de plântulas de soja, desenvolvidas em hidroponia, com glifosato ou com o herbicida aplicado no cotilédone, antes do desenvolvimento das folhas e das raízes secundárias. A análise da morfologia radicular mostrou um aspecto inchado das células da ponta da raiz, similar àquele observado após tratamento com trifluralina, a qual interrompe a mitose celular. O inchamento ocorre muito mais lentamente sob tratamento com glifosato do que com rompedores clássicos da mitose, os quais reagem diretamente com a tubulina. O núcleo das células da raiz tratadas com glifosato mostrou sintomas de perda de microtúbulos, sendo frequentemente observadas células com núcleo fortemente lobado ou micronúcleo e células presas a certos estádios de divisão. O glifosato segura lentamente o crescimento pela diminuição da reserva livre de tubulina para a formação de microtúbulos medulares e corticais nos meristemas das raízes. A estabilidade do microtúbulo foi melhorada com a adição de Ca²⁺

quelatizado. Os cloroplastos das folhas tratadas com glifosato mostraram-se anormais, com a lamela arranjada de forma espiralada em torno dos grana. O amido e a lamela do estroma eram também muito menos abundantes nas plantas tratadas com glifosato. Como outros herbicidas que afetam a divisão celular, o glifosato também evita o acúmulo de Ca²⁺ no interior do mitocôndrio. Assim, o efeito na mitose, através da quebra dos microtúbulos medulares e corticais, pode ser em parte devido a um tipo de desequilíbrio de Ca²⁺. Os efeitos do glifosato na biossíntese de aminoácidos aromáticos e na formação de proteínas desses aminoácidos têm reduzido os níveis de proteínas, como a tubulina, que é crítica para a formação de microtúbulos, levando a divisões aberrantes. A meiose também parece ser afetada pelo tratamento com glifosato; grumos de íons bivalentes, material residual, fragmentos e micronúcleos foram observados em anteras de *Secale cereale* em desenvolvimento (VAUGHN e DUKE, 1986).

3.7. Na permeabilidade de membranas

Cole (1985) considera como negligível o efeito do glifosato na permeabilidade da membrana plasmática. No entanto, O'Brien e Prendeville (1979) observaram maior permeabilidade da membrana celular de *Lemna minor* após determinado período de tempo em que as plantas eram colocadas numa solução de glifosato. O efeito foi avaliado medindo-se a quantidade de eletrólitos lixiviados através de condutivímetro elétrico. A concentração de 10⁻¹ mM de glifosato aumentou a permeabilidade já entre 12 e 24 horas e com 10⁻² mM entre 48 e 96 horas (Tabela 11).

Tabela 11. Efeito do glifosato na lixiviação de eletrólitos em *Lemna minor*. As plantas ficaram 5 horas em incubação em água deionizada após serem submetidas a diferentes períodos de tempo na solução de glifosato.

Glifosato		μS após os períodos de tempo (horas)				
mM	$\mu\text{g mL}^{-1}$	12	24	48	72	96
0	0	10	8	11	6	12
10 ⁻¹	16,9	16	38	30	31	38
10 ⁻²	1,69	10	14	15,6	15,6	24
dms	(P = 0,05)	6	4	3	13	7

Fonte: O'BRIEN e PRENDEVILLE (1979).

A perda no controle da permeabilidade das membranas plasmáticas parece ser a característica universal dos tecidos de plantas doentes, independente do tipo de doença ou da natureza do agente patogênico (WHEELER, 1978).

3.8. Na síntese de clorofila

A redução no teor de clorofila pode ser resultado da menor síntese ou da maior degradação da clorofila pelo glifosato. Tanto em laboratório como em condições de campo, a clorose foi o sintoma comum e precoce da injúria do glifosato às plantas, similar à deficiência de ferro. Durante o crescimento subsequente a clorose desaparece mas pode desenvolver-se em novas folhas, possivelmente devido à falta de clorofila. Há evidências de que o glifosato causa efeitos deletérios na síntese de ácido aminolevulínico (ALA), um precursor na biossíntese de clorofila, que parece ser dependente de ferro (KITCHEN et al., 1981; NILSSON, 1985).

Como se sabe, a biossíntese de clorofila necessita de duas enzimas – a catalase e a peroxidase – que são muito sensíveis à deficiência de ferro, como mostra a Tabela 12, de Marschner (1995).

Tabela 12. Efeito da deficiência de ferro em folhas de tomateiro no conteúdo de clorofila e na atividade enzimática.

Tratamento	Fe nas folhas ($\mu\text{g g}^{-1}$ PF)	Clorofila (mg g^{-1} PF)	Catalase - (atividade relativa) -	Peroxidase
+ Fe	18,5	3,52	100	100
- Fe	11,1	0,25	20	56

Fonte: MACHOD (1986), citado por MARSCHNER (1995).

Nilsson (1985), observando o efeito de metais como o Fe^{3+} e o Mn^{2+} na redução da fitotoxicidade do glifosato, especula que este fenômeno seria devido à menor absorção de glifosato pela ação destes metais ou pela formação de complexos estáveis, nos quais o glifosato permaneceria inativo mesmo após a entrada na planta.

Meschede et al. (2007b), estudando o efeito de maturadores na cana-de-açúcar observaram que o glifosato reduzia os teores de clorofila **a** e clorofila **b** medidas aos 15 dias após a aplicação (DAA), mas aos 30 DAA a diferença desaparecia (Tabela 13). Estranhamente, os teores de clorofila tanto **a** como **b** na testemunha caem para níveis próximos dos observados no tratamento com glifosato aos 30 DAA.

3.9. Na fotossíntese, respiração e transpiração

A aplicação da dose de $2,24 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato com surfactante não afetou a respiração ou a fotossíntese no trigo nas primeiras 24 horas. A respiração permaneceu inalterada durante 216 horas mas a fotossíntese foi reduzida após 72 horas (Tabela 14). O tempo requerido para observar estes efeitos indica que a fotossíntese não é o modo primário de ação ou que o herbicida atua lentamente nos processos fotossintéticos (SPRANKLE et al., 1975c).

Tabela 14. Efeito da aplicação foliar de $2,24 \text{ kg ha}^{-1}$ de glifosato na respiração e fotossíntese de trigo.

Tempo (horas)	Respiração ----- (% do controle) -----	Fotossíntese
0	100	100
3	89	100
24	109	101
72	116	68
216	114	23

Fonte: SPRANKLE et al. (1975c).

Estudando o efeito da aplicação de glifosato em folhas de ervilha, girassol e feijoeiro, Shanner (1978) observou que a transpiração foi reduzida em todas as plantas. Todas as plantas morreram no período de 10 dias após a aplicação da solução de 5 mM de glifosato. A redução da transpiração se daria pela ação direta do glifosato sobre as células-guarda, forçando o fechamento dos estômatos. A observação de que a transpiração só afeta o tecido que recebe dose letal de glifosato poderia indicar que o fechamento dos estômatos é um dos sintomas que antecede a morte e que as células-guarda constituem um dos sistemas mais sensíveis à interrupção do metabolismo celular causado pelo glifosato.

3.10. Na germinação de sementes e no desenvolvimento das plantas

Sprankle et al. (1975c) observaram que a germinação de sementes de trigo, milho e soja plantadas em areia é pouco afetada pela dose de glifosato, o oposto ocorrendo com o crescimento, que ficou bastante reduzido (Tabela 15).

No mesmo trabalho, Sprankle et al. (1975c) estudaram o espectro da sensibilidade ao glifosato em sete espécies vegetais: linho, milho, soja, trigo, cevada, aveia e pepino, na busca de bioensaio para detecção deste produto no solo. Foi observado que, entre estas plantas, o linho foi a mais sensível, ficando o milho, a soja e o trigo no grupo intermediário, e entre as mais resistentes a cevada, a aveia e o pepino (Tabela 16). Os autores observaram também que à medida que aumentava a concentração de glifosato havia dificuldade na emergência das folhas, e muitas vezes as folhas que conseguiam emergir apresentavam cloroses típicas, como as de deficiência de zinco.

Na prática, é difícil que estes efeitos possam se repetir, principalmente em solos com textura média ou argilosa e com altos teores de matéria orgânica. Contudo, isto poderia ocorrer nos solos mais arenosos, com a semeadura feita logo após a dessecação da cobertura com o glifosato.

Tabela 13. Estimativa dos teores de clorofila **a** e **b** em cana-de-açúcar variedade SO 803280 aos 15 e 30 DAA dos maturadores.

Tratamentos	15 DAA		30 DAA	
	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila a	Clorofila b
Glifosato, 200 mL ha^{-1}	8,28	1,96	8,62	2,27
Testemunha	14,12	5,01	6,24	1,57
CV (%)	30	34	6,24	1,57

Fonte: MESCHEDÉ et al. (2007b).

Tabela 15. Efeito do glifosato aplicado em plantas cultivadas em areia (com solução de Hoagland nº 1) por 16 dias.

Glifosato ^a	Germinação ^b			Crescimento		
	Trigo	Milho	Soja	Trigo	Milho	Soja
	----- (%) -----			--- (mg PS planta ⁻¹) ---		
0	93 a	95 a	100 a	33 e	125 d	110 d
0,56 ^c	93 a	100 a	96 a	15 c	47 c	33 c
1,12 ^c	93 a	100 a	93 a	9 bc	19 b	20 b
2,24 ^c	95 a	98 a	98 a	5 ab	17 b	11 ab
4,48 ^c	93 a	98 a	98 a	2 a	4 a	6 a
0,8% MON 0027	93 a	93 a	97 a	28 d	102 d	95 d

^a Sal de mono(dimetilamina) do glifosato.

^b Médias com mesma letra na coluna não diferem significativamente a 5% pelo Teste de Duncan.

^c 0,8% (v/v) MON 0027, surfatante adicionado, produto da Monsanto Company, St. Louis, MO.

Fonte: SPRANKLE et al. (1975a).

Tabela 16. Efeito da dose de 0,56 kg ha⁻¹ de glifosato¹ aplicado em cultura na areia no crescimento de algumas espécies agrícolas.

Espécie	Altura da planta	Peso seco da parte aérea
	----- (% do controle ³) -----	
Linho	14 a ²	20 a
Milho	35 b	45 b
Soja	36 b	33 ab
Trigo	56 c	52 b
Cevada	68 d	71 c
Aveia	82 e	100 c
Pepino	75 de	86 c

¹ Sal de mono(dimetilamina) do glifosato.

² Médias na coluna com mesma letra não diferem em 5% pelo teste Duncan.

³ O controle é o tratamento no qual 0,8% de surfatante foi aplicado na areia.

Fonte: SPRANKLE et al. (1975a).

Como o glifosato e o fosfato competem pelo mesmo sítio de adsorção no solo, há a potencialização da ação deste herbicida com o aumento da dose de fósforo. Contudo, Sprankle et al. (1975a) observaram que esta ação do P pode ser neutralizada mesmo para doses altas como 56 kg ha⁻¹ de glifosato com o aumento do tempo entre a aplicação do herbicida e a semeadura do trigo. Assim, o efeito que era grande com a semeadura efetuada logo após a aplicação do glifosato foi anulado quando deu-se um intervalo de 6 semanas (Tabela 17).

Esta informação é muito importante para os produtores que estão abrindo novas áreas de plantio em Areias Quartzosas do Brasil Central. É sempre conveniente esperar duas ou mais semanas entre a dessecação com o glifosato e o plantio, principalmente considerando-se a grande suscetibilidade da soja ao glifosato. Como mostram os muitos trabalhos de pesquisa que serão apresentados mais adiante.

4. EFEITOS DO GLIFOSATO NAS PLANTAS: IMPLICAÇÕES AGRONÔMICAS

4.1. Um pouco da estória

Antes como POTAFOS e depois como IPNI, o objetivo de nossa missão sempre foi a busca do SASCEM – Sistema Agrícola

Tabela 17. Efeito do intervalo de tempo entre a aplicação de glifosato e a semeadura do trigo em solo arenoso, com duas doses de fósforo, no peso seco de plantas de trigo de 16 dias de idade.

Fosfato (kg ha ⁻¹)	Glifosato (kg ha ⁻¹)	Intervalo de tempo após a aplicação (semanas)		
		0	3	6
		----- (mg planta ⁻¹ PS) -----		
0	0	45	32	34
0	56	21	29	34
196	-	45	35	32
196	56	12	25	31

Fonte: SPRANKLE et al. (1975a).

Sustentável com Colheita Econômica Máxima, principalmente a partir da metade da década de 90, em plena expansão da cultura da soja nos cerrados do País. Na época, o foco central dos pesquisadores e consultores era a adubação balanceada em macro e micronutrientes. Trabalho importante neste sentido foi desenvolvido pelas várias Fundações privadas de pesquisa, como a Fundação MT, Fundação MS e outras mais. E as pesquisas mostraram aumento de produtividade de até 50% com o devido balanço de macro e micronutrientes em relação a apenas macronutrientes na adubação da soja.

Fomos buscar inspiração nos Estados Unidos, que visitamos em 1996 com agricultores e pesquisadores da Fundação MT de Rondonópolis, e novamente em 1998, com agricultores e agrônomos da Cooperativa Integrada e da Sementes Mauá, de Mauá da Serra, PR. Ficou claro que o modelo americano de agricultura de grãos, baseado no trabalho familiar, com alta mecanização, terceirização de muitas operações – como adubação e controle de pragas e doenças –, solos férteis, com lençol freático pouco profundo – e, assim, sem déficit hídrico –, não serviria para o Brasil. Era preciso criar um modelo próprio e aproveitar a vantagem competitiva do País – a possibilidade de fazer fotossíntese o ano todo. Que ajudaria a reciclar nutrientes e aumentar o teor de matéria orgânica do solo, através das plantas de cobertura. E ainda, aumentar a eficiência de máquinas e da mão-de-obra com a implantação do conceito de adubação do sistema de produção.

Estas idéias foram trabalhadas com os GDT's (Grupo de Desenvolvimento de Tecnologia) que criamos para grãos – em Mauá da Serra, PR, com Toshio Watanabe, e em Uberlândia, MG, com Baltazar Fiomari – e para citros – em Novais, SP, com Ronaldo Cabrera, e em Pirassununga, SP, com Márcio Storto.

A feliz coincidência de trabalhar ao mesmo tempo com culturas anuais e uma perene permitiu-nos visualizar o que o manejo diferenciado provocava em uma cultura perene, como citros, ao longo dos anos. Algo impossível de se observar nas culturas anuais, que colhidas após o ciclo de uns poucos meses deixam quase nenhum vestígio dos tratamentos a que foram submetidas.

No trabalho dos grupos com grãos testamos exaustivamente diferentes adubações, densidades e métodos de semeadura buscando altas produtividades para soja e milho. Apesar de alguns sucessos, ficamos frustrados pela falta de repetição dos resultados nos anos seguintes. E sem nenhuma hipótese do que poderia estar causando este problema.

Por outro lado, no trabalho dos grupos com citros só colhemos vitórias. Promovemos mudança para novo manejo, com adubação integral do sistema de produção, ou seja, das plantas de cobertura no meio da rua mais a do pomar para o nível esperado de produtividade de frutos. O teor de boro no solo foi corrigido com

ulexita e não mais com ácido bórico, como no passado, e o gesso foi utilizado conforme as doses indicadas pela EMBRAPA. O manejo das plantas de cobertura no meio da rua passou a ser realizado com roçadeira lateral e não mais com glifosato. A mudança observada foi brutal! Começamos a suspeitar que os resultados positivos estavam relacionados não só ao melhor manejo mas, possivelmente, à falta dos efeitos colaterais negativos do glifosato.

Para esta segunda etapa da busca tivemos a sorte de agregar colaboradores de peso, como Paulo Roberto de Camargo e Castro, especialista em Fisiologia Vegetal, e Ricardo Victória, especialista em Herbicidas, ambos professores da ESALQ-USP. Juntou-se a nós, ainda, um grupo de 20 estudantes para apoio nas pesquisas em laboratório e nos testes em campo. Ronaldo Silveira, da RR Agroflorestal, trouxe-nos sua experiência na área florestal. No CENA, o Professor Malavolta generosamente cedeu-nos parte de sua casa de vegetação para os nossos experimentos. E a Dra. Siu Mui Tsai ajudou-nos nas pesquisas com fixação biológica de nitrogênio.

Conseguimos também parcerias do Exterior. Da Europa, tivemos desde o início o apoio de Volker Römheld, da Hohenheim University, Alemanha, e de Ismail Cakmak, da Sabanci University, Turquia, os dois melhores discípulos de Horst Marschner, o maior nutricionista de plantas do século XX. Dos Estados Unidos tivemos Don Huber, da Purdue University; Robert Kremer, da University of Missouri; Barney Gordon, da Kansas State University; e mais recentemente Guri Johal, da Purdue University, e Bruce Wood, do USDA, ARS, Byron-GA. Do Canadá, desde 2006, contamos com Myriam Fernandez, pesquisadora do Semiarid Praire Agriculture Centre, Agriculture & Agri-Food.

Após anos de trabalho intenso com esse grupo conseguimos entender os mecanismos de transferência do glifosato da planta-alvo para a planta-não alvo, e os diversos efeitos colaterais que ele causa no metabolismo da cultura econômica, como será visto a seguir.

4.2. Transferência do glifosato da planta-alvo para a planta-não alvo

Além da deriva e do glifosato residual do solo, é sabido, desde 1982, que pode haver passagem do glifosato da planta-alvo (invasora) para a planta-não alvo (cultura econômica) adjacente através do contato entre as raízes.

Esta transferência foi comprovada por Rodrigues et al. (1982) estudando os efeitos da exsudação do glifosato de plantas de trigo interplantadas com milho ou com soja no mesmo vaso. No caso do milho, o maior efeito foi na redução do sistema radicular (Tabela 18).

Tabela 18. Efeito de exsudatos de raízes de trigo tratadas com glifosato no desenvolvimento de raízes de milho interplantado no mesmo vaso.

Tratamento	Solo 1	Solo 2
	----- (g) -----	
Testemunha	0,83	0,78
Glifosato (1,1 kg ha ⁻¹)	0,48	0,38

Fonte: RODRIGUES et al. (1982).

A transferência do glifosato de uma planta para outra é fácil de ser provada em laboratório – através dos sintomas que ele causa nas folhas e raízes da planta-não alvo, ou através da medida do ácido chiquímico ou ainda com o uso de glifosato marcado com ¹⁴C.

Trabalhos evidenciando a exsudação radicular do glifosato da planta-alvo e subsequente absorção pelas raízes da planta-não

alvo foram apresentados no I Simpósio Internacional sobre Glyphosate realizado de 15 a 19 de Outubro de 2007 na UNESP, Botucatu. Dois deles com o uso de ¹⁴C-glifosato e o terceiro medindo o acúmulo de chiquimato.

Assim, Santos et al. (2007d), estudando a exsudação radicular de glyphosate por braquiária e seus efeitos em plantas de eucalipto, observaram esta transferência, e que maiores concentrações de ¹⁴C-glifosato foram encontradas em plantas cultivadas no solo arenoso (24% de argila) do que no argiloso (75% de argila) (Figura 15).

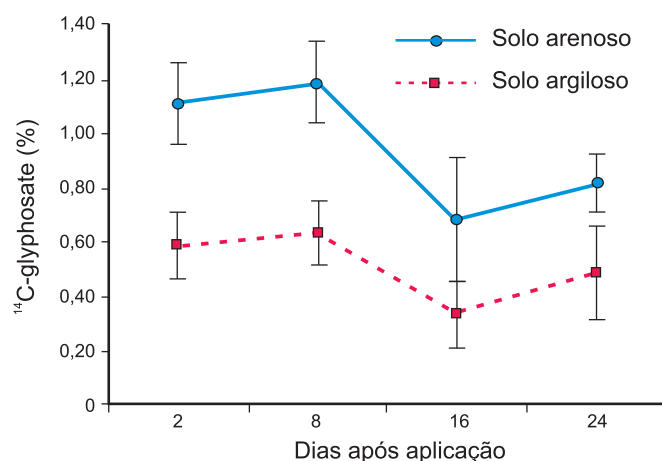


Figura 15. ¹⁴C-glyphosate, em percentual do aplicado na braquiária, presente nas plantas de eucalipto, cultivadas em dois tipos de solo, em função da época de avaliação.

Fonte: SANTOS et al. (2007d).

Também trabalhando com ¹⁴C-glifosato, Ricordi et al. (2007) constataram a translocação radicular de ¹⁴C-glifosato ou metabólitos da *Brachiaria brizantha* (planta-alvo) para mudas de citros e de cafeeiro pela presença de radioatividade nas raízes e na parte aérea das mesmas.

Por meio da determinação dos teores de ácido chiquímico, Vivian et al. (2007) confirmaram que o glifosato aplicado na *Brachiaria decumbens* era exsudado e reabsorvido pela muda de *Eucalyptus grandis* cultivada no mesmo vaso.

A transferência do glifosato da planta-alvo para a planta-não alvo poderia ser parte da explicação para as melhores produtividades obtidas nas culturas anuais com dessecação antecipada (2 a 3 semanas) em relação à semeadura. Com o tempo, o glifosato exsudado pelas raízes e adsorvido pelos colóides do solo (matéria orgânica e argila) pode ser mineralizado pela microbiota do solo, reduzindo-se assim seu efeito danoso.

Römheld (2007), cultivando simultaneamente soja RR (planta-alvo) e girassol (planta-não alvo) observou que a curto prazo (7 dias) houve maior acúmulo de chiquimato (indicador para toxicidade de glifosato) na soja RR cultivada no solo arenoso ($\pm 500 \text{ mg g}^{-1}$ PF de raiz), comparada à cultivada no solo argiloso ($< 50 \text{ mg g}^{-1}$ PF de raiz), retirado do subsolo calcário (Figura 16). E levantou a hipótese da possibilidade de uma rápida imobilização do glifosato pelo maior teor de cálcio neste último, além do maior poder tampão do solo argiloso.

Já com intervalo de tempo maior (28 dias) há queda brusca na transferência do glifosato da planta-alvo para a não alvo, conforme pode-se ver na Figura 17. Enquanto com o intervalo de 7 dias o acúmulo de chiquimato chegava a mais de 500 mg g^{-1} PF raiz, com 28 dias o acúmulo medido em raiz de soja não atingiu 40 mg g^{-1} PF raiz. No entanto, agora a transferência foi maior para o solo argiloso que no arenoso, sugerindo a remobilização do glifosato adsorvido.

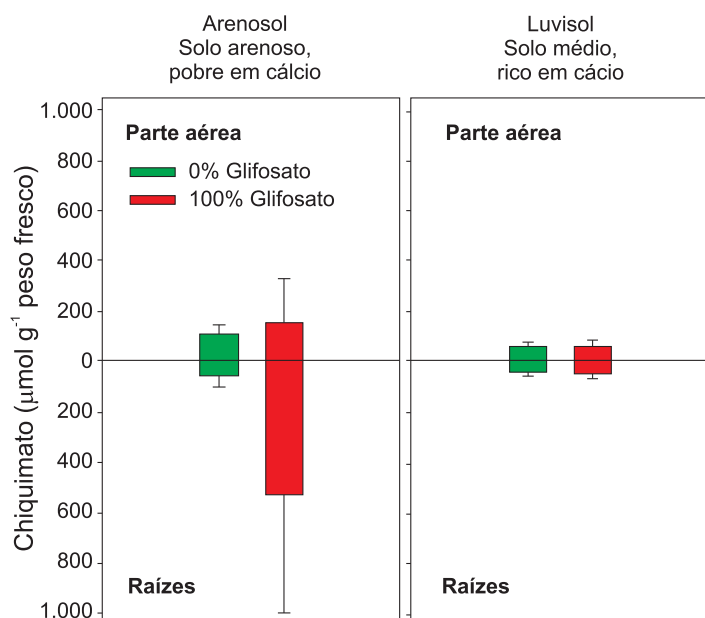


Figura 16. Acúmulo de chiquimato (indicador para toxicidade de glifosato) em girassol (planta-não alvo) medido 7 dias após a aplicação de glifosato na soja RR (planta-alvo).

Fonte: RÖMHELD (2007).

Em resumo:

(1). Existem provas inequívocas da transferência do glifosato da planta-alvo (invasoras ou plantas de cobertura) para a planta-não alvo (cultura econômica).

(2). O devido intervalo de tempo entre a dessecação das invasoras ou das plantas de cobertura pode diminuir esta transferência.

(3). Fica, assim, questionável o uso de glifosato em culturas perenes submetidas a esta transfusão de glifosato ao longo dos anos.

4.3. Efeitos do glifosato no aumento da suscetibilidade das plantas às doenças

Marschner (1995), com a síntese e a precisão que lhe eram peculiares, cita que tivemos considerável progresso no melhoramento e seleção de plantas com maior resistência ou tolerância a doenças e pragas. E que a resistência das plantas pode ser aumentada através da maior formação de barreiras mecânicas (lignificação) e da síntese de compostos de defesa (fitoalexinas). E que, apesar de geneticamente controlados, estes atributos são consideravelmente influenciados por fatores ambientais.

Como tanto a lignificação como a síntese de fitoalexinas nas plantas superiores passam pela rota do ácido chiquímico, é previsível que doses subletais do glifosato predisponham a planta à incidência de doenças, como confirmado por Duke et al. (2006) para *Phytophthora megasperma* e *Pseudomonas syringae* em soja (*Glycine max*), e *Colletotrichum lindemuthianum* e *Pythium* spp. em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), entre outras culturas.

Keen et al. (1982), trabalhando com plântulas decepadas de soja, observaram que doses de glifosato maiores que $10 \mu\text{g mL}^{-1}$ bloqueavam completamente a expressão de resistência para a raça 1 do fungo após 48 horas, e que estas plantas apresentavam sintomas

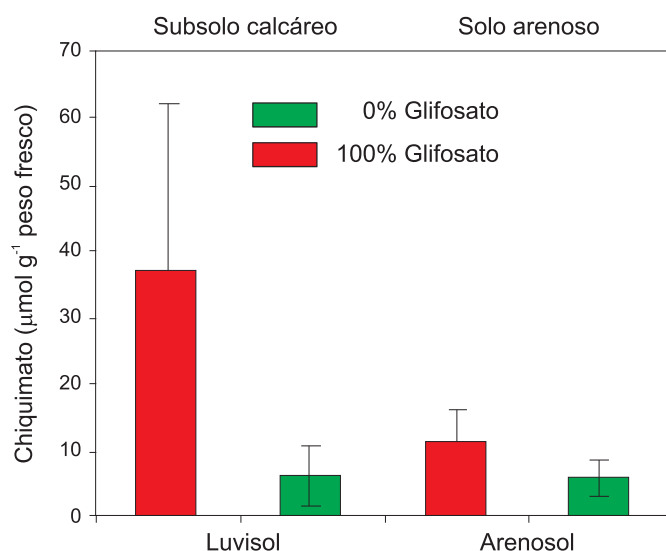


Figura 17. Acúmulo de chiquimato (indicador da toxicidade por glifosato) em soja, 8 semanas após a aplicação de glifosato em *Lolium perenne* cultivado no mesmo vaso.

Fonte: RÖMHELD (2007).

de doenças e níveis de gliceolina similares às das plantas suscetíveis à raça 7. Contudo, o fornecimento de fenilalanina e tirosina 48 horas antes da inoculação causou reação incompatível e alta produção de gliceolina (Tabela 19).

O mesmo fenômeno foi observado por Holliday e Keen (1982) quanto à resistência da soja à bactéria. Que comentam: o fato da acumulação de fitoalexinas ser inibida nas folhas de soja por concentrações subletais de glifosato levanta a possibilidade de que o aumento da severidade de doenças poderia ocorrer em algumas culturas mesmo com a presença de baixos níveis de herbicidas residuais no solo. Para dar idéia mais concreta das concentrações que inibem a síntese de fitoalexinas, a dose de $10 \mu\text{g mL}^{-1}$ equivale a 1 g i.a. de glifosato em 100 litros de água ou 2,8 mL do produto comercial (com 360 g L^{-1} do equivalente ácido do glifosato) em 100 litros de água. É, pois, uma contaminação que poderia ocorrer rotineiramente, no caso de uso de pulverizadores não lavados adequadamente, pela deriva nas pulverizações das culturas perenes, como café e citros, ou ainda na deriva da aplicação aérea.

Tabela 19. Efeitos do glifosato na produção de gliceolina em hipocótilos decepados de soja inoculadas com a raça 1 de *Phytophthora megasperma* f.sp. *glycinea*.

Tratamentos		Reação da planta ^a	Gliceolina	
Inóculo	Glifosato ($\mu\text{g mL}^{-1}$)		Experimento 1 ----- (mg g ⁻¹ PF) -----	Experimento 2
-	-	Nenhuma	10	25
-	10	Nenhuma	20	10
Raça 7	-	Compatível	220	-
Raça 1	-	Incompatível	1.240	1.300
Raça 1	4	Compatível	440	420
Raça 1	10	Compatível	220	130
Raça 1	10 + Phe + Tyr ^b	Incompatível	1.370	1.150

^a Reação da planta avaliada 48 horas após a inoculação.

^b Phe = fenilalanina, Tyr = tirosina, 400 mg mL^{-1} de cada foram fornecidos por 48 horas na câmara de crescimento antes da inoculação.

Fonte: KEEN et al. (1982).

Em citros, o importante papel do escoparone (6,7-dime-toxicumarina) na resistência às doenças de citros é explicada por Afek e Sztejnberg (1995) através da atividade inibitória desta fitoalexina sobre vários fungos fitopatogênicos *in vitro*, mostrada na Tabela 20. Os autores observaram que a produção de escoparone era maior nas plantas resistentes a *Phytophthora citrophthora* que nas suscetíveis. O comprimento da lesão nos ramos era inversamente proporcional ao aumento na concentração de fitoalexina. À medida que a lesão aumentava, a concentração de scoparone reduzia (Figura 18).

Em outro trabalho, estes mesmos autores observaram que AOA (ácido aminooxiacético), inibidor competitivo da PAL, suprimia a produção de escoparone em citros e isto era seguido pela diminuição da resistência. Como o glifosato pode também inibir a síntese de escoparone, é lícito esperar que ele possa estar envolvido na perda de resistência dos citros às doenças, reduzindo a resistência de citros a *P. citrophthora* bem como a outros patógenos.

Tabela 20. Dose efetiva de escoparone para inibição de 50% (DE₅₀) no crescimento micelial de *Phytophthora citrophthora* e na inibição da germinação conidial de seis outros fungos patogênicos *in vitro*.

Espécies de fungos	DE ₅₀ de scoparone (mg mL ⁻¹)
<i>Phytophthora citrophthora</i>	97
<i>Verticillium dahliae</i>	61
<i>Penicillium digitatum</i>	64
<i>Penicillium italicum</i>	60
<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	54
<i>Hendersonula toruloidea</i>	90
<i>Botryodiplodia (Diplodia) natalensis</i>	85

Fonte: AFEK e SZTEJNBERG (1995).

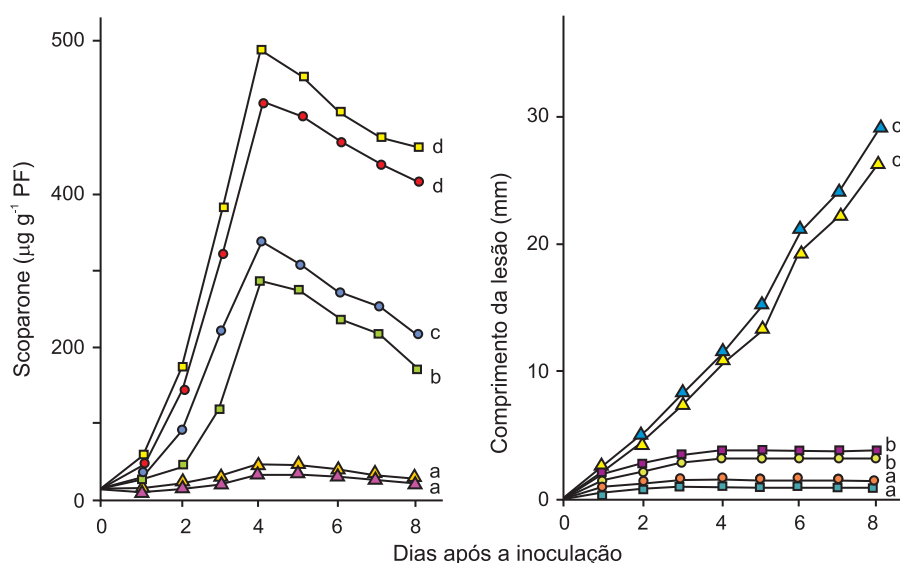


Figura 18. Acumulação de escoparone e comprimento da lesão na casca de *Citrus* de espécies resistentes: macrophylla (□), laranja trifoliata (●), laranja azeda (●) e espécies suscetíveis: limão rugoso (■), Shamouti (▲), Niva (▲) após inoculação com *Phytophthora citrophthora* em temperatura de incubação de 28°C.

Fonte: AFECK e SZTEJNBERG (1995).

Uma outra forma de defesa é a produção de lignina, que pode ser diminuída na planta sob ação do glifosato, conforme Liu et al. (1995), os quais verificaram que a infecção por *Phythium* spp. em feijoeiro pode ser favorecida pelo glifosato devido à redução na produção de lignina e estímulo à germinação e crescimento dos propágulos do patógeno no solo via exsudados da planta.

Em resumo, a pesquisa mostra que: (1) para que a planta tenha resistência às doenças é preciso que ela produza níveis adequados de fitoalexinas e lignina; (2) o glifosato, mesmo em doses subletais, faz o oposto.

4.4. Efeitos do glifosato na cultura da soja

Como a soja é planta dependente da fixação biológica de nitrogênio, ao estudar os efeitos do glifosato na cultura é preciso diferenciar os efeitos na planta dos efeitos no rizóbio.

Já em idos da década de 70, Jaworski (1972) mostrava o efeito depressivo do glifosato sobre *Rhizobium japonicum*. E que este efeito podia ser parcialmente revertido pela adição de fenilalanina e tirosina no meio de cultura – de 88% de inibição com o glifosato para 39% quando era feita esta adição (Tabela 21).

Moorman et al. (1992) observaram que concentrações de 0,5 e 1,0 mM de glifosato inibiam o desenvolvimento mas não eram letais para linhagens de *Bradyrhizobium japonicum* em meio de cultura sem aminoácidos aromáticos, com morte ocorrendo na concentração de 5 mM (Tabela 22). Estes autores comentavam, já em 1992, que repetidas aplicações de glifosato nas variedades de soja resistentes ao herbicida poderiam afetar o rizóbio e que, assim, linhagens de *R. japonicum* resistentes ao glifosato poderiam ser requeridas. Isto porque uma única aplicação foliar de glifosato na dose de 0,5 kg ha⁻¹ pode causar concentrações de até 0,3 mM no tecido radicular de plantas suscetíveis (HONEGGER et al., 1985). Mais recentemente, King et al. (2001) alertam que altas doses ou repetidas aplicações de glifosato podem elevar ainda mais essas concentrações, principalmente em drenos metabólicos mais fortes que o sistema radicular, como é o caso dos nódulos radiculares fixadores de nitrogênio. Estes autores mencionam que a FBN é crítica para a obtenção de alta produtividade da soja cultivada em

solos sem grande disponibilidade de N. Alertam, ainda, que a FBN na soja é mais sensível ao déficit hídrico que outros processos, tais como fotossíntese, trocas gasosas, transpiração, absorção e assimilação do N inorgânico do solo. Qualquer condição que afete adversamente a relação simbiótica entre a soja e o *B. japonicum*, como o glifosato no sistema radicular da soja, poderia também influenciar na sensibilidade da FBN aos déficits hídricos.

No Brasil, Santos et al. (2003) mostram que a ação do glifosato sobre o rizóbio depende das estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* assim como da formulação comercial de glifosato empregada (Tabela 23).

Concluíram estes autores que: (1) todas as estirpes avaliadas foram afetadas pelos componentes do glifosato; (2) a formulação comercial Zapp Qi, comparada ao produto puro e ao produto puro + sal potássico, foi a mais tóxica para SEMIA 5080 e SEMIA 587 e menos tóxica apenas para SEMIA 5019.

Tabela 21. Efeito do glifosato na inibição do crescimento de *Rhizobium japonicum* e sua reversão pela fenilalanina e tirosina.

Tratamento	Concentração (M)	Inibição (%)
Testemunha	-	0
Glifosato (Gli)	10 ⁻⁴	88
Fenilalanina (Phe)	2 x 10 ⁻⁴	0
Tirosina (Tyr)	2 x 10 ⁻⁴	0
Gli + Phe	10 ⁻⁴ + 2 x 10 ⁻⁴	81
Gli + Tyr	10 ⁻⁴ + 2 x 10 ⁻⁴	81
Phe + Tyr	2 x 10 ⁻⁴ + 2 x 10 ⁻⁴	0
Gli + Phe + Tyr	10 ⁻⁴ + 2 x 10 ⁻⁴ + 2 x 10 ⁻⁴	39

Fonte: JAWORSKI (1972).

Tabela 22. Efeito do glifosato no crescimento de estirpes de *Bradyrhizobium japonicum* em meio de cultura sem aminoácidos aromáticos.

Estirpes de <i>B. japonicum</i>	Glifosato (mM)			
	0	0,5	1,0	1,5
	----- (% de inibição) -----			
110	0	41	47	100
123	0	10	12	100
138	0	15	19	100

Fonte: MOORMAN et al. (1992).

Tabela 23. Efeito do produto puro-padrão N-(phosphoromethyl) glycine 18,0 mg L⁻¹ (PMG), PMG sal potássico 27,7 mg L⁻¹ (PMS) e o produto comercial Zapp Qi (36,0 mg L⁻¹) sobre o crescimento de estirpes de *Bradyrhizobium* sp., medido pelo aumento da densidade ótica (DO), 155 horas após a inoculação.

Tratamentos	SEMIA 5019	SEMIA 5080	SEMIA 587
	----- Crescimento relativo (%) -----		
Controle	100,0 aA ¹	100,0 aA	100,0 aA
PMG	72,9 cB	68,8 bB	91,0 bA
PMS	65,5 cB	62,1 bcB	76,2 cA
Zapp Qi	92,3 bA	58,7 cC	73,8 cB

¹ Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: SANTOS et al. (2003).

Já em outro estudo sobre efeitos do glifosato em estirpes de *Bradyrhizobium* em que foi aumentado o número de formulações comerciais do herbicida, Santos et al. (2004) observaram que a formulação Zapp Qi foi a menos tóxica e a formulação Roundup Transorb a mais tóxica às estirpes de *Bradyrhizobium* avaliadas (Tabela 24).

No entanto, a quantificação dos efeitos do glifosato na produtividade da soja só veio com os trabalhos do grupo do professor Jamil Constantin, da Universidade Estadual de Maringá, que mostrava perdas de até 11,2 sacas de soja e 18,5 sacas de milho por hectare apenas por não ter esperado o adequado intervalo de tempo entre a dessecação e a semeadura dessas culturas (CONSTANTIN e OLIVEIRA JUNIOR, 2005).

Tabela 24. Efeito de diferentes formulações de glyphosate (43,2 µg L⁻¹) sobre o crescimento de estirpes de *Bradyrhizobium*, medido por meio do aumento da densidade ótica (DO), 122 horas após a inoculação.

Tratamento	DO 560 nm (%)		
	SEMIA 5019	SEMIA 5080	SEMIA 587
Controle	100,00 aA ¹	100,00 aA	100,00 aA
Trop	40,71 deB	96,27 abA	22,72 cC
Roundup (original)	43,81 deA	6,09 dB	7,45 dB
Agrisato	42,21 deA	3,63 dB	3,82 dB
Roundup Transorb	2,18 fA	0,79 dA	5,59 dA
Roundup WG	34,88 eB	59,75 cA	2,89 dC
Roundup Multiação	49,95 cdB	73,52 bA	1,44 dC
Zapp Qi	74,13 baB	77,21 bA	67,41 bB
PMG ²	56,47 cB	83,36 bA	89,11 aA

¹ Médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha e minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
² Produto puro padrão N-(phosphoromethyl) glycina com 99% de pureza.

Fonte: SANTOS et al. (2004).

Oliveira et al. (2006), da Universidade Estadual de Maringá, estudando a interação entre sistemas de manejo e de controle de plantas daninhas em pós-emergência na cultura da soja, observaram que o manejo antecipado, constituído de duas aplicações – a primeira aos 24 dias antes da semeadura com glifosato e a segunda na data da semeadura com diuron-paraquat – proporcionou maior produtividade da soja, quando comparado aos demais sistemas de manejo (Tabela 25).

Tabela 25. Produtividade de soja (kg ha⁻¹), cv. BRS-154, submetida a diferentes sistemas de manejo e de controle de plantas daninhas em pós-emergência. Campo Mourão, PR, 2003/2004.

Sistemas de manejo	Tratamento em pós-emergência			
	Nenhum	Capina manual	Sequencial	Dose única
	----- (kg ha ⁻¹) -----			
AP ¹	2.037,86 bB ²	2.404,12 aB	2.396,71 aB	2.372,02 aB
10 DAS	2.181,89 bB	2.538,27 aB	2.534,16 aB	2.538,27 aB
Antecipado	2.424,69 bA	2.930,04 aA	2.920,17 aA	2.790,12 aA
Testemunha	890,53			
CV (%)	6,31			

¹ AP = aplique-e-plante, DAS = dias antes da semeadura.

² Médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de agrupamento do Scott Knott (5%).

Fonte: OLIVEIRA et al. (2006).

Comentam os autores que o manejo antecipado resultou em menor infestação após a emergência da soja, facilitando o seu controle. O desenvolvimento inicial da cultura livre de uma massa vegetal é, portanto, muito importante. Neste experimento, em que a soja se desenvolveu inicialmente sem a presença de uma cobertura vegetal, verde ou seca, o melhor desenvolvimento da cultura resultou em maiores produtividades. Assim, no manejo antecipado a soja produziu de 243,0 a 526,2 kg a mais por hectare, em relação aos outros manejos. Esse tipo de resposta da cultura a diferentes tipos de manejo é mais expressivo em áreas onde a cobertura vegetal, seja ela composta por adubos verdes ou por plantas daninhas, é superior a 40-50% da superfície do solo e tem altura suficiente para provocar o sombreamento da cultura a ser implantada. Obviamente,

além do sombreamento, podem ocorrer efeitos alelopáticos e alterações na dinâmica do carbono e do nitrogênio no solo, os quais têm efeitos de intensidade proporcionais à cobertura da área. Em áreas com plantas invasoras ou coberturas verdes recém-germinadas ou quando a cobertura vegetal se dá apenas em pequenas reboleiras, os efeitos dos sistemas de manejo tendem a se igualar com relação ao desenvolvimento e à produtividade da cultura.

No entanto, é bastante plausível inferir também que o menor intervalo de tempo entre a dessecação e a semeadura da soja esteja proporcionando maior translocação de glifosato da planta dessecada para as plântulas de soja emergentes, afetando assim o desenvolvimento radicular, a fixação biológica de nitrogênio, assim como as micorrizas.

Como sugere o trabalho de Lucio et al. (2007), em que o aumento de intervalo de tempo entre a dessecação da cobertura vegetal com 3 kg ha⁻¹ de Roundup WG e a semeadura da soja cultivar Conquista (convencional) proporcionou maior número de nódulos, maior altura da planta e maior massa seca de raízes em relação ao sistema aplique-e-plante (Tabela 26).

Tabela 26. Interferência da época de aplicação nas variáveis analisadas.

Época de aplicação (dias)	Altura (cm)	Raiz (g MS)	Nódulos (n°)
0	37,92 b ¹	5,17 c	84,50 c
7	50,22 a	16,67 a	107,34 bc
14	54,36 a	12,00 b	127,94 ab
21	54,83 a	15,68 a	134,37 a
28	54,62 a	12,35 a	135,94 a
F trat	18,65 **	38,83 **	13,01 **
CV(%)	18,78	33,09	29,14

¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem significativamente entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey; ** significativo pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade.

Fonte: LUCIO et al. (2007).

Efeito do intervalo entre a dessecação da braquiária na micorrização da soja foi observado por Silva et al. (2006), a qual foi reduzida de 55,5%, na parcela roçada, para 31,7%, na parcela dessecada com glifosato, sete dias antes da semeadura, o mesmo não ocorrendo quando o intervalo foi de 14 dias ou mais.

Enquanto na soja convencional a causa da intoxicação por glifosato é quase sempre acidental (deriva) ou por contato com a rizosfera da planta dessecada ainda verde, no caso da soja transgênica ela é deliberadamente pulverizada com este herbicida. Assim, como o rizóbio é sensível ao glifosato, é de se esperar que a FBN seja também afetada, como se observa nos trabalhos seguintes.

Estudando o efeito de mobilidades de aplicação de glyphosate sobre a nodulação de 20 cultivares de soja RR, Dvoranen et al. (2007a) relatam que a formação de rizóbios nas raízes da cultura pode ser afetada por aplicações deste herbicida. Os tratamentos empregados foram: testemunha sem herbicida; glyphosate em aplicação sequencial de 0,54/0,36 kg ha⁻¹ equivalente ácido (EA), aos 12/24 dias após a emergência (DAE); glyphosate em aplicação única de 0,72 kg EA ha⁻¹, aos 20 DAE; glyphosate em aplicação sequencial de 0,72/0,54 kg ha⁻¹, aos 12/24 DAE; glyphosate em aplicação única de 0,90 kg ha⁻¹, aos 24 DAE. Foram avaliadas as variáveis massa seca de nódulos acumulados (MSNT) e número de nódulos acumulados (NN). Concluíram que os cultivares AL83 Tropical, CD213RR, CD214RR, CD219RR, BRS244RR, BRS247RR, ANTA RR, CRISTALINA RR, MSOY6001RR, MSOY800RR,

MSOY8008RR, MSOY8100RR, Valiosa RR e NI apresentaram reduções em pelo menos um dos parâmetros de nodulação avaliados.

Dvoranen et al. (2007b) estudaram também a influência do glifosato na massa seca do sistema radicular (MSSR) de 20 cultivares de soja RR sobre a influência de glifosato. Observaram que os cultivares BRS245RR, MSOY8008RR, MSOY6001RR, BRS247RR e CD213RR tiveram a MSSR reduzida em intensidade semelhante por todas as modalidades de aplicação de glifosato quando comparadas com suas respectivas testemunhas. Já a massa seca da parte aérea (MSPA) foi reduzida pela ação do glifosato nas quatro modalidades de aplicação nos cultivares: MSOY8008RR, Cristalina RR, BRS247RR e Valiosa.

A absorção e a translocação do glifosato com ¹⁴C pela soja transgênica (variedade CD219RR) foi estudada por Santos et al. (2007a). Estes autores detectaram a presença de ¹⁴C-glifosato nos nódulos radiculares de todas as plantas, sendo o maior percentual observado com a formulação Roundup Transorb® e a menor com a formulação Roundup Ready® (Figura 19). Concluem os autores que os resultados obtidos reforçam a hipótese de que o glifosato pode prejudicar a simbiose entre o rizóbio e a soja.

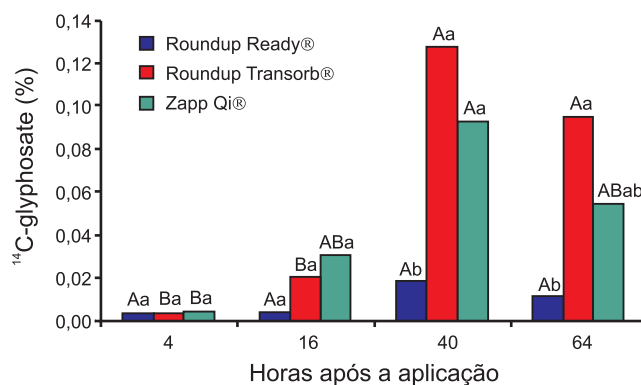


Figura 19. ¹⁴C-glyphosate presente nos nódulos das raízes de plantas de soja (em relação ao total medido) que receberam a aplicação de formulações desse herbicida e posterior quantificação em intervalos de tempo. Colunas sob letras maiúsculas e minúsculas representam médias que não diferem entre si pelo teste de Tukey (P < 0,05), respectivamente para cada formulação entre as horas e para as formulações dentro de cada hora de avaliação.

Fonte: SANTOS et al. (2007a).

Santos et al. (2007b) estudaram o efeito da aplicação de três marcas comerciais de glifosato – Roundup Ready®, Roundup Transorb® e Zapp Qi – sobre a soja transgênica (CD 219 RR), na dose de 2 kg ha⁻¹, quando as plantas estavam com o segundo trifólio completamente expandido. Estes autores observaram que havia relação entre a maior translocação de glifosato para os rizóbios e a redução na produtividade de soja, com o menor rendimento, maior intoxicação e menor número de nódulos radiculares na soja pulverizada com Roundup Transorb®, o oposto ocorrendo com o Roundup Ready® (Tabela 27), corroborando com os dados da pesquisa anterior.

A análise química de amostras foliares coletadas por ocasião do florescimento mostrou o efeito das formulações do glifosato nos teores de nitrogênio, cálcio, ferro e cobre, conforme se observa na Tabela 28.

Os autores creditam a diminuição no teor foliar de nitrogênio ao efeito das formulações de glifosato, principalmente a Transorb, na fixação biológica de nitrogênio. Já a redução no teor foliar de cálcio foi explicada pela menor translocação deste nutriente do hipocótilo para as folhas da soja.

Tabela 27. Valores observados para número de nódulos em plantas de soja resistente ao glifosato por ocasião do florescimento, intoxicação das plantas (15 dias após a aplicação dos herbicidas) e produtividade final de grãos.

Tratamento	Nódulos (nº por planta)	Intoxicação ----- (%) -----	Redimento
Testemunha	33,0 a	0 a	100 a
Roundup Ready	29,5 a	25 b	93 ab
Roundup Transorb	18,3 b	40 c	70 c
Zapp Qi	30,0 a	28 b	81 bc

Nota: diferentes formulações de glifosato foram aplicadas 25 dias após o plantio.

Fonte: SANTOS et al. (2007b).

Tabela 28. Valores observados para os teores de alguns nutrientes presentes nas folhas de soja resistentes ao glifosato coletados por ocasião do florescimento.

Tratamento	N ---- (g kg ⁻¹) ----	Ca	Fe ----- (mg kg ⁻¹) -----	Cu	Mn
Testemunha	36,41 a	11,44 a	643,23 a	7,98 a	142,99
Roundup Ready	27,95 b	8,81 c	208,47 b	4,45 b	176,50
Roundup Transorb	30,89 ab	10,12 b	129,32 b	4,05 b	176,81
Zapp Qi	29,16 b	7,94 b	96,08 b	3,90 b	138,00

Fonte: SANTOS et al. (2007b).

A abrupta diminuição no teor foliar de ferro corrobora os dados de Cakmak 2007 (comunicação particular) de que o glifosato inibe a ação da enzima redutase férrica. Muito significativa foi também a diminuição no teor de cobre foliar para quase metade do teor observado na testemunha. Que aparenta ser o micronutriente de mais difícil correção na cultura da soja. Não foi observado efeito algum sobre o Mn.

Gordon (2007) comenta que, apesar da aceitação generalizada da soja RR (9 x 1, sobre a convencional) nos Estados Unidos, os agricultores estão percebendo que ela (a RR) não está produzindo tanto quanto esperavam, mesmo nas melhores condições de solo e clima. E que existem evidências apontando para interferências do glifosato no metabolismo da planta. E também na população de microrganismos do solo responsáveis pela redução do Mn na forma disponível às plantas (Mn²⁺). Observou que o problema pode ser resolvido com aplicações de Mn via solo (2,8 kg ha⁻¹ Mn), ou via foliar, ou ainda via solo + via foliar (Tabela 29).

Dois trabalhos recentes, um de Gazziero et al. (2007) publicado em Setembro/2007 e outro de Santos et al. (2007b) ainda no prelo, mostram de forma inequívoca que as melhores produtividades de soja RR são alcançadas com a dessecação feita na pré-semeadura. Que corroboram os dados obtidos por Aroldo Marochi (2006), pesquisador da Monsanto.

Marochi (2006), estudando épocas de dessecação de coberturas vegetais – aveia preta, azevém e pousio – observou que os melhores resultados foram obtidos com a dessecação realizada aos 21 dias antes da semeadura. E que havia redução da produtividade a cada semana de atraso na dessecação, conforme Tabela 30.

É interessante observar como o efeito da época de dessecação na produtividade da soja RR depende muito do tipo da cultura anterior. Assim, na Tabela 30 é evidente a grande redução na produtividade da soja RR quando as plantas de cobertura foram des-

Tabela 29. Efeitos do Mn foliar na produtividade da soja.

Estádio de desenvolvimento	Mn (g ha ⁻¹)	Produtividade (kg ha ⁻¹)	(%)
Semeadura	370	4.439	100
Semeadura	740	4.708	106
Semeadura + V4	370 + 370	4.877	110
V4	370	4.439	100
V4 + V8	370 + 370	4.842	109
V4 + V8 + R2	370 + 370 + 370	4.977	112
Testemunha sem Mn	-	4.439	100
DSM (0,05)		201	

Fonte: GORDON (2007).

Tabela 30. Redução na produtividade da soja RR em função da época de aplicação de Roundup® nas plantas de cobertura – aveia preta, azevém e pousio – e em sucessão à cultura de trigo.

Época de dessecação	Plantas de cobertura			Cultura anterior
	Aveia preta ----- (%) -----	Azevém	Pousio	Trigo (%)
21 das ¹	100	100	100	
14 das	-2,1	-7,3	-3,7	
7 das	-6,8	-18,5	-12,3	100
0 das	-11,2	-23,4	-17,2	+ 0,8
7 dds	-17,4	-25,9	-21,2	-1,7
14 dds				-7,1
21 dds				-23,4

¹ das = dias antes da semeadura; dds = dias depois da semeadura.

Fonte: MAROCHI (2006).

secadas aos 7 dias depois da semeadura, exceto para a soja RR logo após o trigo. Fato que poderia ser explicado pelo menor volume de massa verde dessecada antes da semeadura da soja, logo após a colheita do trigo. E, assim, menor quantidade de glifosato translocaria da planta-alvo para a não alvo.

Gazziero et al. (2007), em trabalho oportuno e importante sobre indicações para o uso do glifosato em soja transgênica, alertam que, apesar de ser possível eliminar ou retardar a dessecação em pré-semeadura desta cultura, esta é uma decisão errada que poderá trazer prejuízos no rendimento de grãos (Figura 20), atribuindo estes prejuízos à mato-competição, visto que a produtividade com a dessecação 15 dias após a semeadura foi quase igual à da testemunha, sem controle das invasoras (Figura 21).

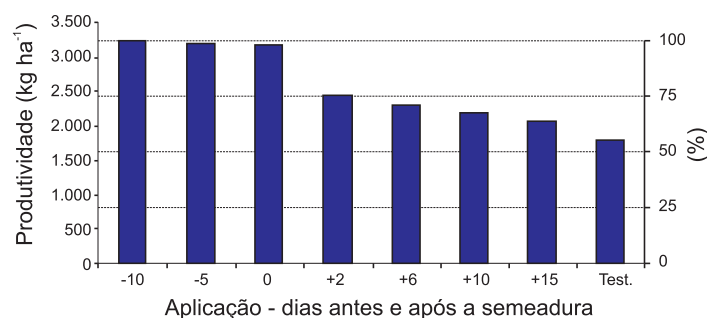


Figura 20. Rendimento da soja RR em função da época de dessecação em pré e pós-semeadura.

Fonte: modificada de GAZZIERO et al. (2007).

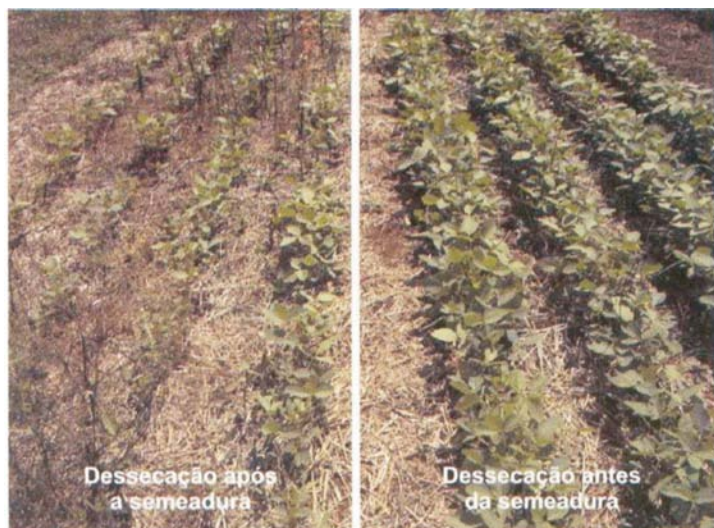


Figura 21. Experimentos confirmam a necessidade de controlar as plantas daninhas antes da semeadura para evitar a influência no desenvolvimento da soja RR.

Fonte: GAZZIERO et al. (2007).

Gazziero et al. (2007) lembram ainda que na soja denominada Roundup Ready o glifosato utilizado deve possuir registro e cadastro junto aos órgãos competentes. Que atualmente o herbicida Roundup Ready encontra-se registrado com formulação correspondente a 648 g do sal de isopropilamina de glifosato ou 480 g de equivalente ácido de glifosato para uso em pós-emergência, como um produto seletivo em área de plantio de soja RR, em aplicações única ou sequencial. E que a dose registrada para aplicação única varia de 1,2 a 2,5 L ha⁻¹ do produto comercial Roundup Ready, no período de 20 a 45 dias após a emergência da cultura, mas que o período ideal para a aplicação única ocorre entre 20 a no máximo 30 dias após a emergência. E ainda que aplicações mais tardias podem favorecer a mato-competição. Mencionam ainda que, conforme o registro do produto Roundup Ready, a primeira dose a ser utilizada deve ser de 1,5 L ha⁻¹ até os 20 dias após a emergência da cultura e a segunda

dose de 1 L ha⁻¹ após 15 a 20 dias da primeira aplicação. E que especificamente para trapoeraba está registrada a aplicação sequencial nas doses de 2,0 L ha⁻¹ seguida de 1,5 L ha⁻¹.

Trabalho de Santos (2007b), ainda no prelo, estudou o efeito da época de dessecação anterior à semeadura sobre o desenvolvimento da soja resistente ao glifosato. Observou o autor que: (1) O melhor desenvolvimento da soja RR foi registrado quando a dessecação com glifosato foi feita entre 7 e 21 dias antes da semeadura; (2) A queda de rendimento nas plantas que receberam o herbicida em pós-emergência foi em média de 23%; (3) na testemunha com *Brachiaria brizantha*, mas sem o controle com o glifosato, o rendimento de grãos foi diminuído em mais de 40%. É possível observar ainda na Tabela 31 que o efeito depressivo na produtividade foi quase nulo com a segunda aplicação de glifosato. No entanto, todos os tratamentos com glifosato no dia da semeadura e a 15 dias após a semeadura tiveram redução no peso da matéria seca de raízes e de nódulos.

A hipótese de que poderia estar havendo efeito direto do glifosato sobre a semente recém semeada ou sobre as plântulas em desenvolvimento, e destas sobre o rizóbio, não pode ser descartada. Aliás, Moorman et al. (1992), como já citado, comentavam que repetidas aplicações de glifosato nas variedades de soja resistentes ao herbicida poderiam afetar o rizóbio e que linhagens de *R. japonicum* resistentes ao glifosato poderiam ser requeridas. Marinho (2004) relata que cientistas das empresas Verdia, Maxigen e Pioneer Hi-Bred desenvolveram um novo gene de resistência ao glifosato. Embora seja parecido com o do "Roundup Ready", da Monsanto, ele seria mais eficiente. A melhoria na tecnologia residiria em dois fatos: primeiro, que as plantas com os novos genes agüentam até seis vezes mais herbicidas; segundo, que o glifosato se degrada, ao invés de ficar depositado nos tecidos da planta. O princípio do novo gene é o seguinte: ele codifica uma proteína que tem a capacidade de degradar o glifosato e transformá-lo em N-acetilglifosato, substância não deletéria à planta. Como a soja RR é resistente ao glifosato, especulamos que esta tecnologia objetiva sua degradação para evitar que seus exsudatos venham a afetar o rizóbio.

Tabela 31. Peso da massa seca da parte aérea, raízes e nódulos e rendimento de grãos de soja RR com diferentes épocas de dessecação com glifosato.

Época de aplicação (dias)		Parte aérea	Raízes	Nódulos	Rendimento
Pré-semeadura	- Pós-semeadura -				
21	-	6,52 a	12,75 a	0,433 a	99,33 a
21	15	3,86 b	7,32 b	0,219 b	77,23 b
21	15 21	3,60 b	5,11 c	0,244 b	77,08
14	-	6,22 a	13,24 a	0,398 a	100,00 a
14	15	4,95 ab	6,89 b	0,213 b	78,54 b
14	15 21	3,91 b	6,32 bc	0,218 b	78,69 b
7	-	6,60 a	12,08 a	0,458 a	92,35 a
7	15	4,37 b	8,52 b	0,199 b	74,33 b
7	15 21	4,21 b	8,64 b	0,223 b	77,56 b
0	-	5,83 a	8,55 b	0,206 b	89,14 ab
0	15	4,43 b	4,45 c	0,235 b	78,65 b
0	15 21	4,13 b	5,95 bc	0,189 b	73,87 b
Sem herbicidas		2,36 a	4,16 c	0,021 c	56,32
CV(%)		7,52	11,33	27,00	11,33

¹ Avaliação realizada no florescimento, 65 dias após a emergência das plantas.

Fonte: SANTOS et al. (2007c).

4.5. Efeitos do glifosato na cultura de citros

Relatos sobre as conseqüências bioquímicas e fisiológicas da aplicação de glifosato atingindo as plantas de citros, ou mesmo outras plantas perenes de grande porte, mostram-se incipientes. No entanto, é relevante a realização de estudos com esta finalidade, pois eventualmente as folhas das plantas de citros são atingidas por ocasião do controle de plantas invasoras nos pomares, seja por pulverizações acidentais causadas por má regulação e uso dos equipamentos de pulverização, seja por contato da superfície das plantas invasoras com as folhas de citros, transferindo parte do produto nelas aplicado, ou por deriva causada pelo vento e pelo contato entre as raízes das plantas invasoras-alvo e o sistema radicular das plantas cultivadas.

Muitos trabalhos mostram que o chiquimato se acumula rapidamente nas plantas sensíveis logo após a aplicação de glifosato. O acúmulo pode ocorrer nas folhas maduras (fonte de fotoassimilados), conforme constatado por Gravena (2006), mas também é mais evidente nas regiões em crescimento das plantas (dreno de fotoassimilados) (BAERSON et al., 2002; BECERRIL et al., 1989; FUCHS et al., 2002; GEIGER et al., 1989; LYDON e DUKE, 1988; PLINE et al., 2002). A maioria dos resultados mostra que o acúmulo de chiquimato está diretamente relacionado ao dano, tanto que Singh e Shaner (1998) propõem a quantificação do chiquimato como um método para identificação da injúria causada por este herbicida.

Mudas de limão ‘Cravo’, com quatro meses, cultivadas em sala climatizada, foram submetidas à aplicação de doses de glifosato: 0, 180, 360 e 720 g e.a. ha⁻¹. No segundo dia, após a aplicação do herbicida, houve acúmulo de chiquimato tanto nas folhas maduras quanto nas novas (GRAVENA, 2006).

Doses letais de glifosato causam aumentos na concentração de chiquimato superiores aos observados por Gravena (2006). Geiger et al. (1986) observaram que o acúmulo de chiquimato em folhas maduras de *Beta vulgaris* (beterraba) inicia-se muito rapidamente, podendo atingir concentração 80 vezes superior à do controle 24 horas após a aplicação. Becerril et al. (1989) estudaram o efeito de doses não letais de glifosato em plantas de *A. theophrasti*. O herbicida foi aplicado em folhas maduras e a avaliação efetuada em folhas novas. Aos 6 dias após a aplicação (DAA), a concentração de chiquimato nas folhas novas das plantas tratadas foi bastante superior à do controle. Fuchs et al. (2002), avaliando folhas maduras de *Abutilon theophrasti*, não detectaram acúmulo de chiquimato em plantas não tratadas, mas, após a aplicação do herbicida, observaram concentrações de até 0,17 µg g⁻¹ de massa fresca. Singh e Shaner (1998), avaliando folhas novas de soja, constataram que a concentração de chiquimato aumentou de aproximadamente 0,4 µmol g⁻¹ para 40 mmol g⁻¹ de massa fresca, aos 8 DAA.

O Professor Paulo R. C. Castro, da ESALQ/USP, observou sintomas característicos do efeito da deriva de glifosato em mudas de citros (Figura 22).

Sintomas visuais de intoxicação pelo glifosato em citros foram observados nos experimentos com aplicação sobre a parte aérea das plantas, nas doses de 360 e 720 g e.a. ha⁻¹ (GRAVENA, 2006). Os sintomas apresentados pelos dois materiais vegetais foram diferentes em função do desenvolvimento das plantas, e podem ser divididos em fases, conforme descrito a seguir:

• ‘Valência’ sobre ‘Swingle’

Fase I: logo após a aplicação, até cerca de 90 dias, algumas poucas folhas maduras ou recém-amadurecidas (folhas totalmente expandidas) apresentaram manchas cloróticas, com centro necro-



Figura 22. Sintomas característicos da deriva de glifosato em mudas de citros.

sado. Estas folhas posteriormente caíram. A queda foi mais acentuada no final da Fase I, que coincidiu com o início da estiagem (mês de junho). As notas de dano visual neste período chegaram a atingir 10% para a maior dose aplicada sobre a parte aérea, considerando-se as folhas sintomáticas e a aparente redução no crescimento. Por ocasião da aplicação, não havia brotações recém emitidas nas plantas.

Fase II: entre 60 e 90 DAA começaram a aparecer as primeiras brotações nas plantas. As plantas atingidas pelo glifosato emitiram tanto brotações normais quanto deformadas (folhas estreitas). Alguns ramos com brotações deformadas também apresentaram queda de folhas e morte da região apical. Este último efeito aparentemente foi favorecido pela deficiência hídrica. As notas de dano visual neste período chegaram a 25% para a maior dose aplicada sobre a parte aérea, considerando-se a desfolha, brotações deformadas e a aparente redução no crescimento.

Fase III: a terceira fase coincide com o início do período das chuvas e a retomada do crescimento das plantas pela intensificação na emissão de brotações. Nesta fase constatou-se evidente recuperação das plantas danificadas pelo glifosato. As novas brotações foram normais, sem qualquer dano. Assim mesmo, as brotações emitidas anteriormente e que se apresentavam deformadas permaneceram na planta, podendo ser facilmente identificadas. As notas de dano chegaram a 12% para a maior dose devido à persistência das brotações deformadas nas plantas (GRAVENA, 2006).

O fato do glifosato ter afetado principalmente as brotações emitidas após sua aplicação permite duas hipóteses associadas ou não: (a) logo após a aplicação, o herbicida se transloca na planta, atingindo as regiões meristemáticas, incluindo gemas axilares, afetando a posterior morfogênese das brotações; (b) quando as brotações estão sendo emitidas, o glifosato não metabolizado pela planta transloca-se juntamente com os fotoassimilados, afetando as brotações durante a morfogênese. Nenhuma destas hipóteses pode ser descartada; no entanto, muitos fatores podem prejudicar a

ocorrência da segunda. Mesmo sendo comum que o glifosato não seja metabolizado pelas plantas (COUPLAND, 1985; GRUYS e SIKORSKI, 1999), diferentes processos podem estar envolvidos na redução de sua disponibilidade no intervalo entre a aplicação e a emissão das brotações deformadas. A sua disponibilidade pode ser afetada pela sua ligação à enzima-alvo (EPSPs), conjugação às moléculas orgânicas (CATANEO et al., 2003), exsudação radicular (RODRIGUES et al., 1982) e, inclusive, alguma metabolização pelas plantas ou por microrganismos presentes nas plantas (COUPLAND, 1985; MONQUERO et al., 2004).

Danos similares, ou seja, clorose e queda de folhas pré-formadas (incluindo a morte de ramos) e má formação das brotações subsequentes foram observadas por Tucker (1977), testando doses de glifosato entre 1,7 e 6,6 kg ha⁻¹ e.a., aplicadas às folhagens de plantas de citros em diferentes idades. O autor observou também que o efeito limitou-se às regiões atingidas pela pulverização de glifosato. Ramos adjacentes não foram afetados. A persistência dos sintomas por até dois anos após a aplicação foi observada por Toth e Morrison (1977).

No trabalho de Gravena (2006), as três doses de glifosato causaram queda de frutos presentes na região atingida pela pulverização. A queda iniciou-se logo na segunda semana após a aplicação do herbicida. Aos 15 DAA, as doses de 360, 720 e 1.080 g ha⁻¹ e.a. de glifosato causaram 9%, 16% e 19% de queda, respectivamente (Figura 23). A queda foi crescente até 45 DAA, após os quais se manteve constante. Aos 60 DAA, a porcentagem de frutos caídos na duas maiores doses foi de 70% e na menor dose foi de 36%. No controle e nas partes das plantas não atingidas pela pulverização de glifosato não se observou a queda de frutos.

A quase totalidade dos frutos que caiu devido ao glifosato (93%) apresentava sintoma de dano. O dano se caracterizou por manchas levemente amareladas e necrose irregular na casca do fruto, atingindo 20% da área externa do fruto, em média, independentemente da dose. Estes danos estiveram localizados principalmente na região do fruto exposta à aplicação do herbicida. Não se verificou dano interno no fruto. Os sintomas foram constatados

quando estes ainda estavam na planta, mas intensificaram-se após a queda (GRAVENA, 2006).

O fato dos danos na casca dos frutos terem se localizado principalmente na região exposta à aplicação indica que o produto que atinge diretamente o fruto tem grande importância na queda. Para confirmar estes indícios Gravena (2006), realizou um segundo experimento, avaliando o efeito do produto que atinge os frutos, as folhas ou frutos + folhas. A queda de frutos foi linearmente crescente a partir de doses superiores a 90 g ha⁻¹ e.a. de glifosato, principalmente quando o herbicida atingiu os frutos. A queda foi pouco significativa para a aplicação atingindo somente as folhas. Portanto, concluiu que a translocação do herbicida na planta teve pouco efeito na queda de frutos.

Trabalhos com outros cultivares de citros avaliando a queda de frutos devido ao glifosato foram conduzidos por Tucker (1977) e Erickson (1996). Os resultados obtidos por estes autores se assemelham aos de Gravena (2006), havendo dependência de dose alta, fruto com estágio avançado de desenvolvimento e aplicação direta sobre o fruto para que ocorra a queda. Tucker (1977) avaliou frutos com seis semanas e cinco meses de idade, dos cultivares Pineapple e Valência, submetido às doses de 1.700 e 3.300 g ha⁻¹ e.a. Os frutos mais novos não foram afetados por ambas as doses. Houve queda de frutos mais velhos nas duas doses, mas foi mais acentuada na maior delas. O autor também verificou danos na casca dos frutos, localizados principalmente na região atingida pela pulverização. Erickson (1996) constatou efeito positivo do aumento na concentração de glifosato na queda de frutos dos cultivares Hamlin, Navel, Ruby Red, Marsh, Pineapple, Valência e Murcott. A resposta dos cultivares foi diferencial e esteve, em parte, correlacionada com o estágio de maturação dos frutos, já que a aplicação foi realizada na mesma época para todos os cultivares. Os cultivares tardios foram menos afetados. O autor também constatou correlação positiva entre a queda de frutos e o conteúdo de sólidos solúveis totais em 'Hamlin' e que a queda é pouco afetada quando o glifosato é aplicado somente nas folhas próximas aos frutos.

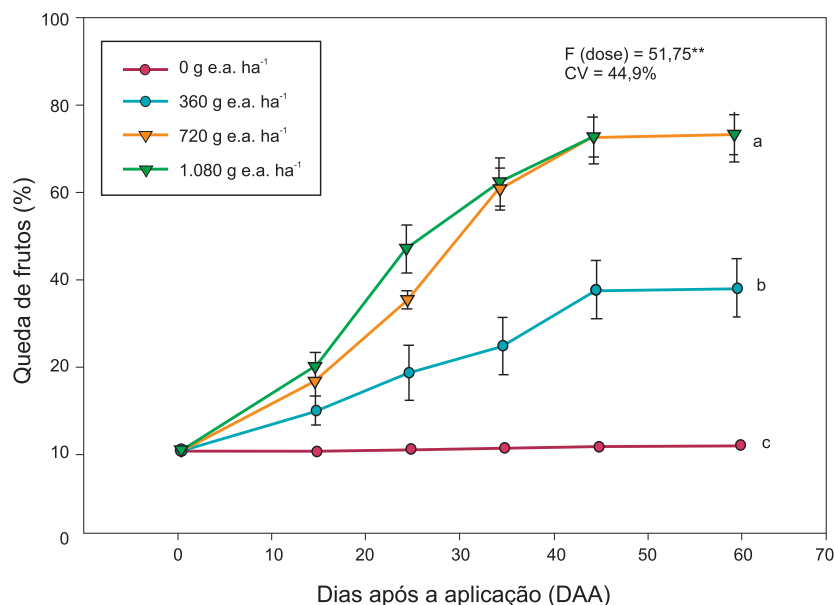


Figura 23. Porcentagem de queda de frutos em função da dose de glifosato aplicada dirigida ao terço basal das plantas. As doses da última avaliação acompanhadas de letras distintas diferiram pelo teste de Tukey a 5%. Os pontos representam as médias com os seus respectivos erros padrões.

Fonte: GRAVENA (2006).

Durante o processo final de maturação dos frutos cítricos, as modificações mais significativas são as que se processam no conteúdo de sólidos solúveis totais, na acidez titulável e na coloração da casca (CASTRO et al., 2001b; MEDINA et al., 2005). O glifosato não afetou a qualidade interna dos frutos, mas proporcionou alteração na coloração e necrose da casca, principalmente nas regiões diretamente atingidas pela pulverização. Este efeito pode ser atribuído ao estímulo na produção de etileno proporcionado pela ação do glifosato.

A mudança natural na coloração da casca dos frutos ocorre devido à degradação das clorofilas e à síntese de carotenóides (CASTRO et al., 2001b; MEDINA et al., 2005). O etileno pode controlar esse processo em frutos cítricos, tanto que é comum sua aplicação exógena, após a colheita, visando o desverdecimento para uniformizar a coloração da casca (AWAD e MOREIRA, 1973; CASTRO et al., 1991; WARDOWSKI et al., 1986). Quando utilizado em doses elevadas, o etileno pode causar efeitos indesejáveis, danificando a casca do fruto (WARDOWSKI et al., 1986).

A consequência final dos efeitos do glifosato é a abscisão dos frutos, que também é controlada pelo etileno (ISMAIL, 1969; ISMAIL, 1971; WARDOWSKI e

McORNACK, 1973). O estímulo da produção de etileno pode, inclusive, ser utilizado no desbaste de frutos cítricos pela aplicação exógena de produtos como o ethephon e o etilconazole (CASTRO et al., 2001b; GUARDIOLA et al., 1988). Abu-Imaileh et al. (1979) verificaram estímulo na produção de etileno causado pelo glifosato em folhas de feijoeiro, correlacionado com o aumento na atividade da enzima celulase. O processo normal de abscisão de folhas e frutos envolve o estímulo, pelo etileno, da atividade da celulase e outras enzimas que atuam nas zonas de abscisão (REID, 1995; TAIZ e ZEIGER, 2004).

Castro et al. (2001b) verificaram que a aplicação de 20 mg L⁻¹ de giberelina + 20 mg L⁻¹ de ácido naftalenacético promoveu remissão dos sintomas de clorose variegada dos citros (CVC). Prates et al. (1983, 1988) observaram que árvores de citros com sintomas iniciais de declínio dos citros pulverizadas com 20 mg L⁻¹ de GA + 8 mg L⁻¹ de 2,4-D tiveram remissão dos sintomas da anomalia fisiológica. Serciloto et al. (2003) verificaram que a aplicação de 20 mg L⁻¹ de giberelina em lima ácida 'Tahiti' elevou o teor de clorofila nas folhas, aumentou a fixação de dióxido de carbono da fotossíntese e a taxa transpiratória.

O uso da cobertura vegetal para o controle de invasoras é estudado há muito tempo. Assim, há 47 anos Gallo e Rodrigues (1960) já mostravam a importância das leguminosas e principalmente da cobertura morta com capim gordura no aumento da produtividade da laranjeira 'Hamlin'. A cobertura morta com capim gordura aumentou a produção em 105% em relação ao cultivo com o uso de herbicidas. E o teor de P foliar em 28% (Tabela 32).

Apesar de feito há tanto tempo, muitas conclusões tiradas pelos autores são válidas e conferem com as que observamos hoje,

Tabela 32. Efeitos de práticas de cultivo do solo na produção e no teor foliar de P de laranjeira Hamlin enxertada sobre laranjeira caipira.

Práticas de cultivo	Produção (kg/árvore)	P foliar	
		(g ha ⁻¹)	(%)
Herbicidas	40,7	1,18	100
Duas lavras	47,7	1,24	105
Limpo + guandu	49,6	1,27	107
Limpo + mucuna	60,9	1,36	115
Cobertura morta	83,7	1,52	128

Massa verde: 18 t ha⁻¹ de mucuna, 10 t ha⁻¹ de guandu e 50 t ha⁻¹ de cobertura morta de capim gordura.
Fonte: GALLO e RODRIGUEZ (1960).

como, por exemplo, (1) redução do teor foliar de N com cobertura de gramíneas e (2) aumento no teor de P foliar com a cobertura morta. Resultado semelhante, mostrando a importância da palhada na produtividade de citros, foi obtido por Cabrera (2007).

Manejo alternativo ao sistema convencional (Figuras 24 e 25), com o uso de roçadeira com lançamento lateral da massa tritura da das invasoras e plantas de cobertura, tem tido muito sucesso entre os citricultores. Estima-se que este manejo já foi adotado em mais de 70% dos citricultores no Estado de São Paulo. É tecnologia em constante evolução. As novas roçadeiras trabalham rente aos troncos das árvores, assim como busca-se a implantação do consórcio de leguminosas com gramíneas nas entrelinhas.

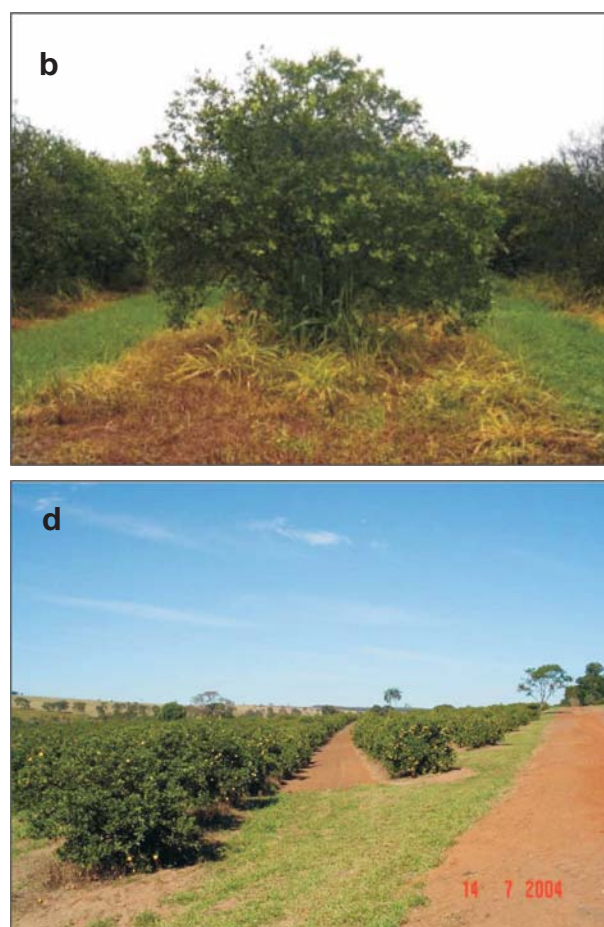


Figura 24. Manejo convencional das invasoras na citricultura: (a) trator com barra aplicadora de herbicida; (b) glifosato aplicado na linha de plantio e roçadeira no meio da rua; (c) glifosato em área total; (d) glifosato na linha e grade no meio da rua.

Crédito das fotos: (a) T. Yamada; (b), (c) e (d) Márcio Storto.



Figura 25. Manejo alternativo das plantas de cobertura na citricultura: (a) roçadeira lateral em ação; (b) resíduos roçados lançados debaixo da saia da planta; (c) braquiária consorciada com *Arachis pintoi*; (d) braquiária consorciada com ervilhaca peluda.
Crédito das fotos: T. Yamada.

A afirmativa de que o glifosato é rapidamente mineralizado no solo nem sempre é evidente. Assim, é comum observar plantas com sintomas típicos da intoxicação em áreas de reforma de pomares não tratados com glifosato (Figura 26) – indicando a triste transferência do problema de uma geração para outra.



Figura 26. Herdando o glifosato da cultura anterior?
Crédito da foto: Carlos Eduardo Sichieri.

Resumindo, a contaminação de glifosato na cultura de citros pode causar sintomas típicos foliares, aumento de chiquimato (medida bioquímica da intoxicação por glifosato), desfolha e aborto de

frutos. Método alternativo, com uso de plantas de cobertura e roçadeira lateral, tem dado ótimos resultados.

4.6. Efeito do glifosato na cultura da cana-de-açúcar

Netto (2006) menciona que a maturação é considerada como um dos aspectos mais importantes na produção de cana-de-açúcar. E que a falta de cultivares com maturação precoce e produtivos pode ser contornada empregando-se maturadores químicos e, assim, suprir as usinas com cana madura o ano todo. Os produtos tradicionalmente utilizados como maturadores de cana-de-açúcar pertencem ao grupo dos inibidores de crescimento – o glifosato e o fluazifop-butil (fusilade), e ao dos retardadores de crescimento – o ácido (2-cloroetil) fosfônico (ethephon), o etil trinexapac (moddus) e o sulfometurom metil (curavial).

O efeito maturador desses produtos se dá pelo aumento de etileno nas plantas. Verifica-se pela Figura 27 que os maturadores aplicados precoce (retardadores) ou tardiamente (inibidores) na cana-de-açúcar provocam a maturação pelo estresse causado na planta, seja através da redução do comprimento do entrenó (carretel) seja por meio de lesão (dessecação) apical localizada, respectivamente. O estresse leva à síntese endógena de ácido abscísico (ABA) e de etileno. Apesar do ácido indolilacético (IAA) e da benziladenina (BA) estimularem a ação estressante, o ABA tende a restringir o estresse, semelhantemente ao efeito de uma chuva (reidratação). A presença de metionina tende a produzir s-adenosil metionina (SAM) que sob estresse passa a ácido 1-carboxílico 1-amino ciclopropano (ACC), precursor do etileno. Neste ponto,

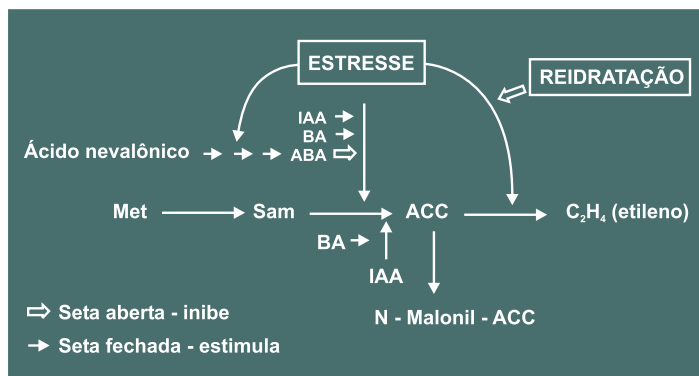


Figura 27. Maturadores de cana-de-açúcar: estresse modificador da participação de fotoassimilados.

IAA novamente pode estimular a síntese de etileno, sendo que BA favorece o efeito de IAA. ACC pode também formar n-malonil-ACC, restringindo a produção de etileno.

Netto (2006) comenta que todos os reguladores vegetais são absorvidos via foliar, o que dificulta a aplicação devido ao porte do canavial, pois não existe equipamento tratorizado que consiga realizar esta operação a contento. E que para contornar este problema realiza-se a aplicação aérea seguindo critérios técnicos como: altura de vôo de 5 metros em relação ao alvo; aplicação sempre no sentido transversal ao vento; aplicação suspensa sempre que a velocidade do vento for zero ou superior a 10 km/h; umidade relativa do ar sempre superior a 55%; temperatura inferior a 30°C e vazão de 30 L ha⁻¹. E que devido a estas pré-condições os períodos de aplicação restringem-se ao amanhecer e ao entardecer.

Devido a problemas industriais, existe uma tendência de utilização preferencial de retardadores em relação a inibidores. Além do mais, freqüentemente ocorre uma redução na fitomassa da cana-de-açúcar quando tratada com inibidores de crescimento, conforme mostra trabalho do Professor Paulo Roberto de Camargo e Castro (Figura 28), assim como trabalhos de Leite et al. (2007) e Siqueira et al. (2007), resumidos na Tabela 32.

Observa-se na Figura 28 que no estudo do efeito comparado de ethephon (Ethrel), fluazifop-butil (Fusilade) e glifosato (Roundup) na produção de cana-de-açúcar 'SP70-1143', aos 172 dias após os tratamentos precoces, houve uma tendência dos maturadores reduzirem o rendimento da cana, mostrando efeito mais pronunciado do glifosato restringindo a produtividade em cerca de 30% em relação ao controle.

Considerando os possíveis danos ambientais e agrícolas que causam os maturadores – tanto os inibidores como os retar-

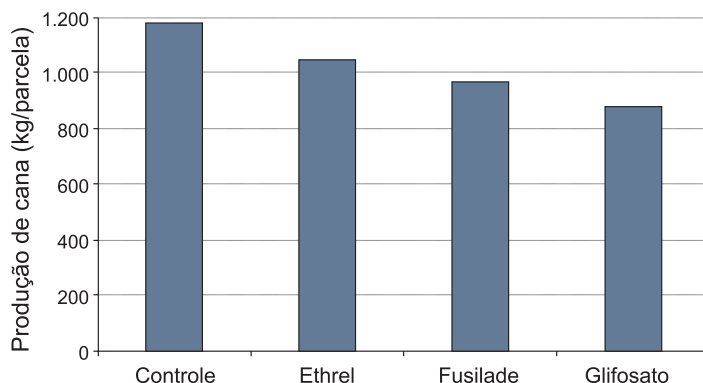


Figura 28. Peso da produção por parcela (4 linhas de 20 m) da cana-de-açúcar 'SP 70-1143', tratada com maturadores, na colheita aos 172 dias após os tratamentos precoces.

adores de crescimento –, fica questionável o uso destes produtos. Como eles promovem o aumento do teor etileno nas plantas, podem potencialmente aumentar a incidência de doenças nas plantas pela ação do etileno que leva à perda do controle da permeabilidade plasmática, que é, de acordo com Wheeler (1978), a causa primária de todas doenças, não importando a natureza do patógeno.

Dr. James Rahe, que muito estudou os efeitos do glifosato no aumento da incidência de doenças de plantas e que aqui esteve em Março/2007, informou-nos que no Canadá é proibida a aplicação via aérea de glifosato. Por que será que continua sendo permitida no Brasil?

5. CONCLUSÕES

- O glifosato é um potente herbicida sistêmico, de pós-emergência, não seletivo, capaz de controlar efetivamente todas as invasoras na agricultura através da inibição da enzima 5-enolpiruvil-chiquimato-3-fosfato sintase (EPSPs).
- No solo o glifosato pode ser adsorvido, dessorvido e degradado, com meia-vida de dissipação entre 14,5 e 25,8 dias e meia-vida de mineralização entre 252,6 e 282,1 dias em Latossolo Vermelho distroférrico.
- Tem uma série de efeitos no metabolismo secundário das plantas, tais como: na síntese do ácido indolilacético (IAA), na síntese do etileno, na síntese de compostos fenólicos, na síntese de aminoácidos e de proteínas, na ultraestrutura celular, na permeabilidade de membranas, na síntese de clorofila, na fotossíntese, respiração e transpiração, na germinação de sementes e desenvolvimento das plantas, entre outras mais.

Tabela 32. Produtividade de colmos da cana-de-açúcar variedade RB 855453 e SP 80-3280 sob efeitos de maturadores em início de safra e meio de safra, respectivamente. Igaracú do Tietê, SP.

Tratamentos	Início safra (RB 855453) ¹		Meio da safra (SP80-3280) ²	
	2004 (90 DAA)	2005 (90 DAA)	2004 (174 DAA)	2005 (90 DAA)
	----- (t cana ha ⁻¹) -----			
Testemunha	131 abA	113 aB	110,6 aA	85,3 aB
Glifosato	126 abA	104 abB	107,2 aA	79,9 bB
Sulfometuron methyl	134 aA	112 aB	109,3 aA	83,7 abB
C.C. + glifosato	123 bA	100 bB	93,0 aA	85,0 aA
CV(%)	7,63	11,24	21,51	4,44

Fonte: ¹LEITE et al. (2007) e ²SIQUEIRA et al. (2007).

• Desde o início da década de 80 sabia-se que o herbicida aplicado na planta-alvo (invasoras) translocava-se para a planta não alvo (cultura econômica) através do contato radicular. Fenômeno este comprovado nas pesquisas recentes com ¹⁴C-glifosato e também pela medida do chiquimato, aceito hoje como método para avaliar a contaminação por glifosato. Sabendo-se desta transferência do glifosato de uma planta para outra fica questionável a sua utilização em culturas perenes.

• A planta contaminada com glifosato tem o crescimento da parte aérea e do sistema radicular diminuído além de perda da resistência contra doenças, mesmo com doses baixas como 3 mL ha⁻¹ do produto comercial.

• Na cultura da soja, tanto para os cultivares transgênicos RR como para os convencionais, os trabalhos de pesquisa mostram melhores produtividades com a dessecação antecipada com glifosato realizada 14 dias ou mais antes da semeadura, devido a possíveis efeitos na planta e/ou no rizóbio e/ou na micorriza.

• Na cultura de citros é comum ocorrer intoxicação por efeitos diretos da deriva e/ou da transferência da pulverização do glifosato nas invasoras. Método alternativo com o controle das plantas de cobertura com roçadeira lateral tem apresentado ótimos resultados.

• Na cultura da cana-de-açúcar é questionável a aplicação de maturadores por via aérea, em específico a de glifosato, pois ao aumentar o teor de etileno, para acelerar a maturação, este mesmo etileno pode promover a instalação de doenças nas culturas adjacentes, como citros e outras perenes.

6. DEDICATÓRIA

Os autores dedicam este trabalho à Eng^a Agr^a Silvia Regina Stipp e Abdalla em reconhecimento e agradecimento pelo seu dedicado trabalho de editoração, normatização, revisão e diagramação, refletido na excelente qualidade das publicações do IPNI.

7. REFERÊNCIAS

ABU-IRMAILEH, B. E.; JORDAN, L. S.; KUMANOTO, T. Enhancement of CO₂ and ethylene production and cellulase activity by glyphosate in *Phaseolus vulgaris*. **Weed Science**, Chichester, v. 27, p. 103-105, 1979.

AFEK, U.; SZTEJNBERG, A. Scoparone (6,7-dimethoxycoumarin), a citrus phytoalexin involved in resistance to pathogens. In: DANIEL, M. L.; PURKAYASTHA, R. P. (Ed.). **Handbook of phytoalexin metabolism and action**. New York: Marcel Dekker, 1995. p. 263-286.

AGRIOS, G. N. **Plant pathology**. London: Academic Press, 1997. 635 p.

ANDRÉA, M. M. de; PERES, T. B.; LUCHINI, L. C.; BAZARIN, S.; PAPINI, S.; MATALLO, M. B.; SAVOY, V. L. T. Influence of repeated applications of glyphosate on its persistence and soil bioactivity. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 11, p. 1329-1335, 2003.

AWAD, M.; MOREIRA, L. O. G. Efeito do ácido 2-cloroetilfosfônico (ethephon) no desverdecimento de laranjas das variedades “Pêra” e “Lima” (*Citrus sinensis* L.). **Revista de Agricultura**, Piracicaba, v. 48, n. 2/3, p. 111-116, 1973.

BAERSON, S. R.; RODRIGUEZ, D. J.; BIEST, N. A.; TRAN, M.; YOU, J.; KREUGER, R. W.; DILL, G. M.; PRATLEY, J. E.; GRUYS, K. J. Investigating the mechanism of glyphosate resistance in rigid ryegrass (*Lolium rigidum*). **Weed Science**, Champaign, v. 50, p. 721-730, 2002.

BAKER, E. A. Chemistry and morphology of plant epicuticular waxes. In: CUTLER, D. F.; ALVIN, K. L.; PRICE, C. E. (Ed.). **The plant cuticle**. London: Academic Press, 1982. p. 140-161.

BARTEL, B. Auxin biosynthesis. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 48, p. 51-66, 1997.

BAUR, J. R. Effect of glyphosate on auxin transport in corn and cotton tissues. **Plant Physiology**, v. 63, p. 882-886, 1979.

BECERRIL, J. M.; DUKE, S. O.; LYDON, J. Glyphosate effects on shikimate pathway products in leaves and flowers of velvetleaf (*Abutilon theophrasti* Medic.). **Phytochemistry**, Oxford, v. 28, p. 695-699, 1989.

BOHN, H. L.; McNEAL, B. L.; O’CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979. p. 73.

CABRERA, R. A. D. **Adição de palhada e boro na qualidade do solo e produtividade em pomar comercial de laranja “Pêra” [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck]**. 2006, 93 f. Tese (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 2006.

CABRERA, R. A. D. **Uso de boro e palhada no manejo sustentável e produção de citrus [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck]**. 2007, f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, Piracicaba, 2007.

CAÑAL, M. J.; TAMÉS, R. S.; FERNÁNDEZ, B. Effects of glyphosate on phenolic metabolism in yellow nutsedge leaves. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 69, p. 627-632, 1987.

CASELEY, J. C.; COUPLAND, D. Environmental and plant factors affecting glyphosate uptake movement and acidity. In: GROSSBARD, E.; ATKINSON, D. A. (Ed.). **The herbicide glyphosate**. London: Butterworths, 1985. p. 92-123.

CASTRO, H. G.; FERREIRA, F. A.; SILVA, D. J. H.; MOSQUIM, P. R. **Contribuição ao estudo das plantas medicinais: metabólitos secundários**. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2001. 104 p.

CASTRO, J. V.; FERREIRA, V. L. P.; PIO, R. M. Influência da temperatura no desverdecimento e qualidade do tangor Murcote. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 12, n. 1, p. 211-224, 1991.

CASTRO, P. R. C.; MEDINA, C. L.; ALMEIDA, M. Response of citrus variegated chlorosis (CVC) - infected ‘Pera’ sweet orange to growth regulators. **Proceedings of the Interamerican Society for Tropical Horticulture**, v. 43, p. 104-107, 2001.

CASTRO, P. R. C.; MARINHO, C. S.; PAIVA, R.; MENEGUCCI, J. L. P. Fisiologia da produção dos citros. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 20, p. 26-38, 2001b.

CATANELO, A. C.; DESTRO, G. F. G.; FERREIRA, L. C.; CHMMA, H. L.; SOUSA, D. C. F. Atividade da glutatona S-transferase na degradação do herbicida glyphosate em plantas de milho (*Zea mays*). **Planta Daninha**, Viçosa, v. 21, n. 2, p. 307-312, 2003.

CHACHALIS, D.; REDDY, K. N.; ELMORE, C. D. Characterization of leaf surface, wax composition, and central of redvine and trumpet creeper with glyphosate. **Weed Science**, Champaign, v. 49, p. 156-163, 2001.

- CHEAH, U. B.; KIRKWOOD, R. C.; LUM, K. Y. Adsorption, desorption and mobility of four commonly used pesticides in Malaysian agricultural soils. **Pesticide Science**, v. 50, p. 53-63, 1997.
- CHEAH, U. B.; KIRKWOOD, R. C.; LUM, K. Y. Degradation of four commonly used pesticides in Malaysian agricultural soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 46, p. 1217-1223, 1998.
- COLE, D. J. Mode of action of glyphosate - a literatura analysis. In: GROSSBARD, E.; ATKINSON, D. (Ed.). **The herbicide glyphosate**. London: Butterworths, 1985. p. 48-74.
- COLE, D. J.; DODGE, A. D.; CASELEY, J. C. Some biochemical effects of glyphosate on plant meristems. **Journal of Experimental Botany**, v. 31, p. 1665-1674, 1980.
- CONSTANTIN, J.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S. de. Dessecação antecedendo a semeadura direta pode afetar a produtividade. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 109, p. 14-15, 2005.
- COUPLAND, D. Metabolism of glyphosate in plants. In: GROSSBARD E.; ATKINSON, D. A.(Ed.). **The herbicide glyphosate**. London: Butterworths, 1985. p. 25-34.
- DEVINE, M. D.; DUKE, S. O.; FEDTKE, C. **Physiology of herbicide action**. New Jersey: P T R Pretince Hall, Englewood Cliffs, 1993. 441 p.
- DIGBY, J.; WAREING, P. F. The effect of applied growth hormones on cambial division and the differentiation of the cambial derivatives. **Annals of Botany**, v. 30, n. 119, p. 539-549, 1966.
- DUKE, S. O.; HOAGLAND, R. E. Effects of glyphosate on metabolism of phenolic compounds. In: GROSSBARD, E.; ATKINSON, D. (Ed.). **The herbicide glyphosate**. London: Butterworth, 1985. p. 92-123.
- DUKE, S. O.; CERDEIRA, A. L.; MATALLO, M. B. Uso de herbicidas e seus efeitos em doenças vegetais. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 115, p. 1-4, 2006.
- DVORANEN, E. C.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; CAVALIERI, S. D.; BLAINSKI, E.; FRANCHINI, L. H. M.; RIOS, F. A.; ALONSO, D. G.; BIFFE, D. F. Efeito de modalidades de aplicação de glyphosate sobre a nodulação de vinte cultivares de soja RR. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007a. p. 182-186. 1 CD-ROM.
- DVORANEN, E. C.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; CAVALIERI, S. D.; BLAINSKI, E.; FRANCHINI, L. H. M.; RIOS, F. A.; ALONSO, D. G.; BIFFE, D. F. Influência do glyphosate sobre o acúmulo de massa seca do sistema radicular de vinte cultivares de soja RR. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007b. p. 191-193. 1 CD-ROM.
- EBERBACH, P. Applying non-steady-state compartmental analysis to investigate the simultaneous degradation of soluble and sorbed glyphosate [n-(phosphonomethyl)glycine] in four soils. **Pesticide Science**, Chichester, v. 52, p. 229- 240, 1998.
- ERICKSON, C. G. Management of glyphosate-related citrus fruit drop. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Winter Haven, v. 109, p. 40-42, 1996.
- FRANZ, J. E. Discovery, development and chemistry of glyphosate. In: GROSSBARD, E.; ATKINSON, D. (Ed.). **The herbicide glyphosate**. London: Butterworths, 1985. p. 3-17.
- FRANZ, J. E.; MAO, M. K.; SIKORSKI, J. A. **Glyphosate: a unique global herbicide**. Washington: AOS monograph, 1997. 653 p.
- FUCHS, M. A.; GEIGER, D. R.; REYNOLDS, T. L.; BOURQUE, J. E. Mechanisms of glyphosate toxicity in velvetleaf (*Abutilon theophrasti* Medic.). **Pesticide Biochemistry and Physiology**, Orlando, v. 74, p. 27-39, 2002.
- GALLI, A. J. B.; MONTEZUMA, M. C. **Alguns aspectos da utilização do herbicida glifosato na agricultura**. São José dos Campos: Monsanto do Brasil Ltda., 2005. 66 p.
- GALLO, J. R.; RODRIGUEZ, O. Efeitos de algumas práticas de cultivo do solo na nutrição mineral de citros. **Bragantia**, v. 19, n. 23, p. 345-360, 1960.
- GAZZIERO, D. L. P.; ADEGAS, F. S.; VOLL, E. **Indicações para o uso de glyphosate em soja transgênica**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 3 p. (Circular Técnica, 49)
- GEIGER, D. R.; KAPITAN, S. W.; TUCCI, M. A. Glyphosate inhibits photosynthesis and allocation of carbon to starch in sugar beet leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 82, n. 2, p. 468-472, 1986.
- GEIGER, D. R.; TUCCI, M. A.; SERVIATES, J. C. Glyphosate effects on carbon assimilation and gas exchange in sugar beet leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 85, n. 2, p. 365-369, 1989.
- GLASS, R. L. Adsorption of glyphosate by soils and clay minerals. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 35, p. 497-500, 1987.
- GORDON, B. Manganese nutrition of glyphosate-resistant and conventional soybeans. **Better Crops**, v. 91, n. 4, p. 12-13, 2007.
- GRAHAM, R. D.; WEBB, M. J. Micronutrients and disease resistance and tolerance in plants. In: MORTWEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Micronutrients in agriculture**. Madison: Soil Science Society of America, Inc., 1991. p.329-370.
- GRAVENA, R. **Respostas bioquímicas e fisiológicas de plantas de citros atingidas pelo glifosato**. 2006. 144p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- GRUYS, K. J.; SIKORSKI, J. A. Inhibitors of tryptophan, phenylalanine and tyrosine biosynthesis as herbicides. In: SINGH, B. K. **Plant amino acids: biochemistry and biotechnology**. New York: Marcel Dekker, 1999. p. 357-384.
- GUARDIOLA, J. L.; AGUSTÍ, M.; BARBERÁ, J.; GARCIA-MARI, F. Influencia de las aplicaciones de ácido giberélico durante la brotación en el desarrollo de los agrios. **Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos**, Valencia, v. 20, p. 139-143, 1988.
- HADERLIE, L. C.; SLIFE, F. W.; BUTLER, H.S. ¹⁴C-glyphosate absorption and translocation in maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) seeds and in soybean plants. **Weed Research**, v. 18, p. 269-273, 1978.
- HAHLBROCK, K.; SCHEEL, D. Physiology and molecular biology of phenylpropanoid metabolism. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 40, p. 347-369, 1989.

- HENSLEY, D. L.; BEUERMAN, D. S. N.; CARPENTER, P. L. The inactivation of glyphosate by various soils and metal salts. **Weed Research**, v. 18, n. 5, p. 287-291, 1978.
- HETHERINGTON, P. R.; MARSHALL, G.; KIRKWOOD, R. C.; WARNER, J. M. Absorption and efflux of glyphosate by cell suspensions. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 49, n. 320, p. 527-533, 1998.
- HOAGLAND, R. E.; DUKE, S. O.; ELMORE, C. D. Effects of glyphosate on metabolism of phenolic compounds. III. Phenylalanine ammonia-lyase activity, free amino acids, soluble protein and hydroxyphenolic compounds in axes of dark-grown soybeans. **Physiologia Plantarum**, v. 46, p. 357-366, 1979.
- HOLLÄNDER, H.; AMRHEIN, N. The site of inhibition of the shikimate pathway by glyphosate: inhibition by glyphosate of phenylpropanoid synthesis in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench.). **Plant Physiology**, Rockville, v. 66, p. 823-839, 1980.
- HOLLIDAY, M. J.; KEEN, N. T. The role of phytoalexins in the resistance of soybean leaves to bacteria: effect of glyphosate on glyceollin accumulation. **Phytopathology**, St. Paul, v. 72, p. 1470-1474, 1982.
- HONEGGER, J. L.; BROOKS, J. M.; ANDERSON, E. J.; PORTER, C. A. Glyphosate transport in plants. In: CRONSHAW, J.; LUCAS, W. J.; GIAQUINTA, R. T. **Phloem transport**. New York: Alan R. Liss, Inc., 1985. p. 609-626.
- IRELAND, R. J. Amino acid and ureide biosynthesis. In: DENNIS, D. T.; TURPIN, D. H.; LEFEBRE, D. D.; LAYZELL, D. B. (Ed.) **Plant metabolism**. London: Longman, 1997. p. 478-494.
- ISMAIL, M. A. Differential abscission of citrus leaves, mature and immature fruits by ethylene, and cycloheximide. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Winter Haven, v. 82, p. 230-234, 1969.
- ISMAIL, M. A. Seasonal variation in bonding force and abscission of citrus fruit in response to ethylene, ethrel, and cycloheximide. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Winter Haven, v. 84, p. 77-81, 1971.
- JAWORSKI, E. G. Mode of action of N-phosphonomethylglycine: inhibition of aromatic amino acid biosynthesis. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 20, p. 1195-1198, 1972.
- KEEN, N. T.; HOLLIDAY, M. J.; YOSHIKAWA, M. Effects of glyphosate on glioclolin production and the expression of resistance to *Phytophthora megasperma* f. sp. *glycinea* in soybean. **Phytopathology**, St. Paul, v. 72, p. 1467-1470, 1982.
- KING, A. C.; PURCELL, L.; VORIES, E. A. Plant growth and nitrogenase activity of glyphosate-tolerant soybean in response to foliar glyphosate applications. **Agronomy Journal**, v. 93, n. 1, p. 179-186, 2001.
- KINJO, T. **Apontamentos de aula**. Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", s/d.
- KITCHEN, L. M.; WITT, W. W.; RIECK, C. E. Inhibition of chlorophyll accumulation by glyphosate. **Weed Science**, Champaign, v. 29, p. 513-516, 1981.
- KOZLOWSKI, T. T. How healthy plants grow. In: HORSFALL, J. G.; COWLING, E. B. (Ed.) **Plant disease - an advanced treatise**. v. 2. How plants suffer from disease. London: Academic Press, 1978. p. 19-51.
- LEE, T. T. Mode of action of glyphosate in relation to metabolism of indole-3-acetic acid. **Physiologia Plantarum**, v. 54, p. 289-294, 1982a.
- LEE, T. T. Promotion of indole-3-acetic acid oxidation by glyphosate in tobacco callus tissue. **Journal of Plant Growth Regulation**, v. 1, p. 37-48, 1982b.
- LEE, T. T.; MULKEY, T. J.; EVANS, M. L. Reversible loss of gravitropic sensitivity in maize roots alter tip application of calcium chelators. **Science**, v. 220, p. 1375-1376, 1983.
- LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SURIANO, A. Desenvolvimento e produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função da aplicação de maturadores em início de safra. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007. p. 263-266. 1 CD-ROM.
- LIU, L.; PUNJA, Z. K.; RAHE, J. E. Altered root exudation and suppression of induced lignification as mechanism of predisposition by glyphosate of bean roots (*Phaseolus vulgaris* L.) to colonization by *Pythium* spp. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, London, v. 51, p. 111-127, 1997.
- LUCIO, F. R.; COSTA, P. L. da; PAULO, A. A.; TIMOSSO, P. C. Influência da época de dessecação de diferentes coberturas vegetais na formação de nódulos em soja. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007. p. 162-164. 1 CD-ROM.
- LYDON, J.; DUKE, S. O. Glyphosate induction of elevated levels of hydroxybenzoic acids in higher plants. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 36, p. 813-818, 1988.
- MARINHO, M. V. Novo gene ameaça domínio da Monsanto. **FolhaCiência**, São Paulo, 24/05/2004, p. A9.
- MAROCHI, A. Estudos sobre o manejo antecipado da soja Roundup Ready®. **Newsletter Monsanto em Campo**, edição VIII, ano II, Março de 2006. 2 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. New York: Academic Press, 1995. p. 315.
- McCONNEL, J. S.; HOSSNER, L. R. pH-dependent adsorption isotherms of glyphosate. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 33, p. 1075-1078, 1985.
- McKEON, T. A.; FERNANDEZ-MACULET, J. C.; YANG, S. F. Biosynthesis and metabolism of ethylene. In: DAVIES, P. J. (Ed.) **Plant hormones: physiology, biochemistry and molecular biology**. Dordrecht: Kluwer, 1995. p. 118-139.
- MEDINA, C. L.; RENA, A. B.; SIQUEIRA, D. L.; MACHADO, E. C. Fisiologia dos citros. In: MATTOS JUNIOR, D.; DE NEGRI, J. D.; PIO, R. M.; POMPEU JUNIOR, J. (Ed.) **Citros**. Campinas: Instituto Agrônomo e Fundag, 2005. cap. 7, p. 149-184.
- MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A. Teores de clorofilas e carotenóides na cana-de-açúcar submetida à aplicação de maturadores. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: UNESP, 2007a. p. 296-298. 1 CD-ROM.
- MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A.; CORRÊA, M. R. Determinação do teor de lignina e celulose em amostras de

- Brachiaria decumbens* submetidas à subdoses de glyphosate. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007b. p. 82-84. 1 CD-ROM.
- MESCHEDE, D. K.; VELINI, E. D.; CARBONARI, C. A.; MORAES, C. P. Teores de celulose e lignina na cana-de-açúcar submetida à aplicação de maturadores. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** FCA-Botucatu: UNESP, 2007c. p. 302-303. 1 CD-ROM.
- MILES, C. J.; MOYE, H. A. Extraction of glyphosate herbicide from soil and clay minerals and determination of residues in soils. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 36, p. 486-491, 1988.
- MONQUERO, P. A.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; OSUNA, M. D.; PRADO, R. A. Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 445-451, 2004.
- MOORE, R.; EVANS, M. L. How roots perceive and respond to gravity. **American Journal of Botany**, v. 73, n. 4, p. 574-587, 1986.
- MOORMAN, T. B.; BECERRIL, J. M.; LYDON, J.; DUKE, S. O. Production of hydroxybenzoic acids by *Bradyrhizobium japonicum* strains after treatment with glyphosate. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 40, p. 289-293, 1992.
- MOSHIER, L. J.; PENNER, D. Factors influencing microbial degradation of ¹⁴C-glyphosate to ¹⁴CO₂ in soil. **Weed Science**, Champaign, v. 26, p. 686-691, 1978.
- NETTO, J. M. Maturadores e reguladores vegetais na cultura da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 307-318.
- NILSSON, G. Interactions between glyphosate and metals essential for plant growth. In: GROSSBARD, E.; ATKINSON, D. (Ed.). **The herbicide glyphosate**. Chapter 4. London: Butterworths, 1985. p. 35-47.
- NOMURA, H. S.; HILTON, H. W. The adsorption and degradation of glyphosate in five Hawaii sugarcane soils. **Weed Research**, Oxford, v. 17, p. 113-121, 1977.
- O'BRIEN, M. C.; PRENDEVILLE, G. N. Effect of herbicides on cell membrane permeability in *Lemna minor*. **Weed Research**, v. 19, p. 331-334, 1979.
- OLIVEIRA JUNIOR, R. S.; CONSTANTIN, J.; COSTA, J. M.; CAVALIERI, S. D.; ARANTES, J. G. Z.; ALONSO, D. G.; ROSO, A. C.; BIFFE, D. F. Interação entre sistemas de manejo e de controle de plantas daninhas em pós-emergência afetando o desenvolvimento e a produtividade da soja. **Planta Daninha**, v. 24, n. 4, p. 721-732, 2006.
- PAXTON, J. D. Biosynthesis and accumulation of legume phytoalexins. In: SHARMA, R. P.; SALUNKHE, D. K. (Ed.). **Mycotoxins and phytoalexins**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 485-499.
- PETERSON, C. A.; De WILDT, P. P. O.; EDGINGTON, C. V. A rationale for the ambimobile translocation of the nematicide oxyamyl in plants. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 8, p. 1-9, 1978.
- PICCOLO, A.; CELANO, G. Hydrogen bonding interactions between the herbicide glyphosate and water-soluble humic substances. **Environmental Toxicology Chemistry**, v. 13, p. 1737-1741, 1994.
- PICCOLO, A.; CELANO, G.; CONTE, P. Adsorption of glyphosate by humic substances. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 44, p. 2442-2446, 1996.
- PICCOLO, A.; GATTA, L.; CAMPANELLA, L. Interactions of glyphosate herbicide with a humic acid and its iron complex. **Annals of Chemistry**, v. 85, p. 31-40, 1995.
- PLINE, W. A.; WILCUT, J. W.; DUKE, S. O.; EDMISTEN, K. L.; WELLS, R. Tolerance and accumulation of shikimic acid in response to glyphosate applications in glyphosate-resistant and nonglyphosate resistant cotton (*Gossypium hirsutum* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v. 50, p. 506-512, 2002.
- PRATA, F. **Comportamento do glifosato no solo e deslocamento miscível de atrazina**. 2002. 149 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.
- PRATA, F.; LAVORENTI, A. Retenção e mobilidade de defensivos agrícolas no solo. In: ALLEONI, L. R. F.; REGITANO, J. B. (Org.). **Apostila do Simpósio sobre Dinâmica de Defensivos Agrícolas no Solo: aspectos práticos e ambientais**. ESALQ/USP, 2002. p. 57-69.
- PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; TORNISIELO, V. L. Influência da matéria orgânica na sorção e dessorção do glifosato com diferentes atributos mineralógicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 947-951, 2000.
- PRATA, F.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; VEREECKEN, H.; TORNISIELO, V. L.; PELISSARI, A. Glyphosate behavior in a Rhodic Oxisol under no-till and conventional agricultural systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 61-69, 2005.
- PRATES, H. S.; CASTRO, P. R. C.; SOUZA, W.; DIONÍSIO, A.; APPEZZATO, B. Ação de reguladores vegetais no declínio dos citros. **Summa Phytopathologica**, v. 9, p. 220-229, 1983.
- PRATES, H. S.; CASTRO, P. R. C.; GUIRADO, N.; MELOTTO, E.; MULLER, G. W. Remissão dos sintomas iniciais do declínio de citros pela aplicação de reguladores vegetais. **Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**, v. 45, n. 1, p. 229-240, 1988.
- QUINN, J. P. Interactions of the herbicides glyphosate and glufosinate (phosphinothricin) with the soil microflora. In: ALTMAN, J. (Ed.) **Pesticides interactions in crop production** - beneficial and deleterious effects. Boca Raton: CTC Press, 1993. p. 245-265.
- REID, M. S. Ethylene in plant growth, development and senescence. In: DAVIES, P. J. (Ed.). **Plant hormones: physiology, biochemistry and molecular biology**. Dordrecht: Kluwer, 1995. p. 486-508.
- RICORDI, A. H.; TORNISIELO, V. L.; ALMEIDA, G. P. A. Translocação de ¹⁴C-glifosato entre *Brachiaria brizantha* e mudas de café (*Coffea arabica*) e citros (*Citrus limonia* Osbeck). In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. **Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007. p. 307-310. 1 CD-ROM.
- RODRIGUES, J. J. V.; WORSHAM, A. D.; CORBIN, F. T. Exudation of glyphosate from wheat (*Triticum aestivum*) plants and its effects

- on intraplanting corn (*Zea mays*) and soybeans (*Glycine max*). **Weed Science**, Chichester, v. 30, p. 316-320, 1982.
- RÖMHELD, V. Dinâmica do glifosato nas rizosferas das plantas-alvo e não alvo. In: **PROBLEMAS DE NUTRIÇÃO E DE DOENÇAS DE PLANTAS NA AGRICULTURA MODERNA: AMEAÇAS À SUSTENTABILIDADE?**, 2007, Piracicaba. Piracicaba: IPNI, 2007. ICD-ROM.
- ROSS, J.; O'NEIL, D. New interactions between classical plant hormones. **Trends in Plant Science**, v. 6, p. 21, 2001.
- SANTOS, J. B.; PROCÓPIO, S. O.; JACQUES, R. J. S.; KASUYA, M. C. M.; SILVA, S. A. Comportamento de estirpes de *Bradyrhizobium* sp. sob efeito de componentes do glyphosate potássico. **Revista Ciência Agronômica**, v. 34, n. 2, p. 201-206, 2003.
- SANTOS, J. B.; FERREIRA, E. A.; OLIVEIRA, J. A.; SILVA, A. A.; FIALHO, C. M. T. Efeito de formulações na absorção e translocação do glyphosate em soja transgênica. **Planta Daninha**, v. 25, n. 2, p. 281-388, 2007a.
- SANTOS, J. B.; SANTOS, E. A.; FIALHO, C. M. T.; SILVA, A. A.; FREITAS, M. A. M. Época de dessecação anterior à semeadura sobre o desenvolvimento da soja resistente ao glifosato. **Planta Daninha**, v. 25, n. 4, 2007b (no prelo).
- SANTOS, J. B.; FERREIRA, E. A.; REIS, M. R.; SILVA, A. A.; FIALHO, C. M. T.; FREITAS, M. A. M. Avaliação de formulações de glyphosate sobre soja Roundup Ready. **Planta Daninha**, v. 25, n. 1, p. 165-171, 2007c.
- SANTOS, J. B.; JACQUES, R. J. S.; PROCÓPIO, S. O.; KASUYA, M. C. M.; SILVA, A. A.; SANTOS, E. A. Efeitos de diferentes formulações comerciais de glyphosate sobre estirpes de *Bradyrhizobium*. **Planta Daninha**, v. 22, n. 2, p. 293-299, 2004.
- SANTOS, L. D. T.; TIBURCIO, R. A. S.; SANTOS, J. B.; FERREIRA, F. A.; OLIVEIRA, J. A.; BENTIVENHA, S.; FERREIRA, L. R. Exsudação radicular de glyphosate por braquiária e seus efeitos em plantas de eucalipto. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007d. p. 318-321. 1 CD-ROM.
- SERCILOTO, C. M.; CASTRO, P. R. C.; RIBEIRO, R. V.; TAVARES, S.; MEDINA, C. L.; MACHADO, E. C. Biorreguladores na fixação dos frutos da lima ácida 'Tahiti'. **Laranja**, Cordeirópolis, v. 24, n. 2, p. 383-395, 2003.
- SERVATES, J. C.; TUCCI, M. A.; GEIGER, D. R. Glyphosate effects on carbon assimilation, ribulose biphosphate carboxylase activity, and metabolite levels in sugar beet leaves. **Plant Physiology**, Rockville, v. 85, n. 2, p. 370-374, 1987.
- SHANNER, D. L. Effects of glyphosate on transpiration. **Weed Science**, v. 26, p. 513-515, 1978.
- SHIEH, W. J.; GEIGER, D. R.; SERVATES, J. C. Effect of N-(Phosphonomethyl)glycine on carbon assimilation and metabolism during a simulated natural day. **Plant Physiology**, Rockville, v. 97, n. 3, p. 1109-1114, 1991.
- SINGH, B. K.; SHANER, D. L. Rapid determination of glyphosate injury to plants and identification of glyphosate-resistant plants. **Weed Technology**, Champaign, v. 12, p. 527-530, 1998.
- SIQUEIRA, G. F.; LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Desenvolvimento e produtividade de colmos de cana-de-açúcar em função da aplicação de maturadores em meio de safra. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007. p. 267-269. 1 CD-ROM.
- SILVA, A. C.; SANTOS, J. B.; KASUYA, M. C. M.; SILVA, A. A.; MANABE, A. Micorrização e épocas de dessecação de *Brachiaria brizantha* no desenvolvimento da soja. **Planta Daninha**, v. 24, n. 2, 2006.
- SPRANKLE, P.; MEGGIT, W.; PENNER, D. Rapid inactivation of glyphosate in the soil. **Weed Science**, Chichester, v. 23, p. 224-228, 1975a.
- SPRANKLE, P.; MEGGIT, W.; PENNER, D. Adsorption, mobility and microbial degradation of glyphosate in soil. **Weed Science**, Chichester, v. 23, p. 229-234, 1975b.
- SPRANKLE, P.; MEGGIT, W. F.; PENNER, D. Absorption, action, and translocation of glyphosate. **Weed Science**, v. 23, p. 235-240, 1975c.
- STAHLMAN, P. W.; PHILLIPS, W. M. Effects of water quality and spray volume on glyphosate phytotoxicity. **Weed Science**, Chichester, v. 27, n. 1, p. 38-41, 1979.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TOTH, J.; MORRISON, G. Glyphosate drift damages fruit trees. **Agricultural Gazette of New South Wales**, Sydney, v. 88, p. 44-45, 1977.
- TUCKER, D. P. H. Glyphosate injury symptom expression in citrus. **HortScience**, Alexandria, v. 12, n. 5, p. 498-500, 1977.
- TURNER, D. J.; LOADER, M. P. C. Studies with solubilized herbicide formulations. In: **BRITISH WEED CONTROL CONFERENCE, 12., 1974, Brington. Proceedings...** London, 1974. p. 177-184.
- VAUGHN, K. C.; DUKE, S. O. Ultrastructural effects of glyphosate on *Glycine max* seedlings. **Pesticide Biochemistry and Physiology**, v. 26, p. 56-65, 1986.
- VIVIAN, R.; GIMENES, M. J.; REIS, A. R. dos; SAN MARTIN, H. A.; LABONIA, V.; TEZOTTO, T. Potencial fitotóxico de glyphosate em eucalipto a partir da exsudação radicular de brachiaria. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE GLYPHOSATE, 1., 2007, Botucatu. Anais...** Botucatu: FCA-UNESP, 2007. p. 318-321. 1 CD-ROM.
- WANG, C. Y. Effect of glyphosate on aromatic amino acid metabolism in purple nutsedge (*Cyperus rotundus*). **Weed Technology**, Champaign, v. 15, p. 628-635, 2001.
- WARDOWSKI, W. F.; McCORNACK, A. A. Recommendations for degreening Florida fresh citrus fruits. **HortScience**, Alexandria, v. 12, n. 5, p. 498-500, 1973.
- WARDOWSKI, W. F.; NAGY, S.; GRIERSON, S. **Fresh citrus fruits**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1986. 571 p.
- WHEELER, H. Disease alterations in permeability and membranes. In: HORSFALL, J. G.; COWLING, E. B. (Ed.). **Plant disease - an advanced treatise**. v. 2. How plants suffer from disease. London: Academic Press, Inc., 1978. p. 327-347.
- WHETTEN, R.; SEDEROFF, R. Lignin biosynthesis. **Plant Cell**, Rockville, v. 7, p. 1001-1013, 1995.
- ZABLOTOWICZ, R. M.; REDDY, K. N. Impact of glyphosate and *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis; with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview. **Journal of Environmental Quality**, v. 33, p. 825-831, 2004.