



RUBEM SILVÉRIO DE OLIVEIRA JR.
JAMIL CONSTANTIN
MIRIAM HIROKO INOUE

Biologia e manejo de plantas daninhas



www.omnipax.com.br

omnipax
editora

Rubem Silvério de Oliveira Jr.
Jamil Constantin
Miriam Hiroko Inoue
(Editores)

Biologia e Manejo de Plantas Daninhas



2011

Copyright ©2011 Omnipax Editora Ltda
Caixa Postal: 16532 - 81520-980 Curitiba, PR



A editora disponibiliza por acesso livre a versão eletrônica deste livro no *site*: <http://www.omnipax.com.br>, sob uma licença *Creative Commons Attribution 3.0*.

Capa:

Sérgio Alexandre Prokofiev

Foto da capa:

Eng. Agrônomo Luiz Henrique Morais Franchini
Plântula de *Conyza sumatrensis* (buva)

Projeto gráfico e editoração:

Omnipax Editora Ltda

Impressão:

Pix Bureau Gráfica e Editora

Ficha catalográfica:

Adriano Lopes (CRB9/1429)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B615 Biologia e Manejo de Plantas Daninhas / editores:
Rubem Silvério de Oliveira Jr., Jamil Constantin e
Miriam Hiroko Inoue. — Curitiba, PR: Omnipax, 2011
348 p.

Vários autores
Inclui biografias
ISBN: 978-85-64619-02-9
eISBN: 978-85-64619-05-0

1. Ervas daninhas – Controle biológico. 2. Plantas – Efeitos dos herbicidas. 3. Herbicidas. 4. Fitopatologia. I. Oliveira Jr., Rubem Silvério ed. II. Constantin, Jamil. III. Inoue, Miriam Hiroko. IV. Título.

CDD (22. ed.)632.96



Núcleo de Estudos Avançados em
Ciência das Plantas Daninhas



Departamento de Agronomia
UEM - Maringá - PR



Gado de Leite



Milho e Sorgo

Colaboradores

Alessandro de Lucca e Braccini: Doutor em Fitotecnia (UFV, 1996), Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, PR.

Alessandro Magno Brighenti: Doutor em Fitotecnia (UFV, 1995), Pesquisador da EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Gado de Leite, Juiz de Fora, MG.

Dauri José Tessman: Doutor em Fitopatologia (University of Florida, 1999), Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, PR.

Jamil Constantin: Doutor em Agricultura (UNESP Botucatu, 1996), Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, PR.

Marcos Antonio Bacarin: Doutor em Fisiologia Vegetal (UFV, 1995), Professor Associado do Departamento de Botânica, Instituto de Biologia, Universidade Federal de Pelotas, RS.

Maurílio Fernandes de Oliveira: Doutor em Produção Vegetal (UENF, 1999), Pesquisador da EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Miriam Hiroko Inoue: Doutora em Agronomia (UEM, 2006), Professora do Departamento de Agronomia da Universidade do Estado de Mato Grosso, Tangará da Serra, MT.

Nádja de Moura Pires de Oliveira: Doutora em Fitotecnia (UFV, 1998), Brasília, DF.

Rubem Silvério de Oliveira Jr.: Doutor em Fitotecnia (UFV, 1998), Professor Associado do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, PR.

Valter Rodrigues Oliveira: Doutor em Genética e Melhoramento (UFV, 1997), Pesquisador da EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, Brasília, DF.

Dedicatória

Este livro é dedicado ao Prof. Dr. José Francisco da Silva, professor aposentado do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, em reconhecimento ao seu pioneirismo na área da Ciência das Plantas Daninhas no Brasil e ao treinamento de um incontável número de ex-alunos e orientados, os quais hoje estão espalhados pelo Brasil como uma continuação viva de seu trabalho.

Biologia e Manejo de Plantas Daninhas é uma obra destinada aos acadêmicos de graduação em Agronomia e dos diversos programas de pós-graduação relacionados à Agronomia. O objetivo do livro é oferecer subsídios para a discussão aprofundada dos principais aspectos da área de Ciência das Plantas Daninhas. Inicialmente são abordados aspectos importantes relacionados aos conceitos básicos ligados à multiplicação, ao estabelecimento, à classificação e às principais características das plantas daninhas, assim como aos efeitos destas sobre as espécies de interesse econômico. A seguir, são discutidos os principais métodos de manejo e também estratégias alternativas relacionadas ao controle biológico e à alelopatia. Na sequência são introduzidos os conceitos básicos relacionados ao controle químico das plantas daninhas e são discutidas as principais formas de classificação dos herbicidas, com ênfase nos mecanismos de ação. Posteriormente a temática relacionada os herbicidas é aprofundada, discutindo-se como estes são absorvidos, translocados e como controlam as plantas daninhas de forma seletiva. Finalmente, são discutidos temas relacionados ao desenvolvimento e diagnóstico da resistência de plantas daninhas aos herbicidas e ao destino destas moléculas no solo e no ambiente. Tendo em vista a atualidade do tema relacionado ao cultivo de espécies resistentes ao glyphosate, também são discutidas as misturas de herbicidas contendo glyphosate.

Rubem Silvério de Oliveira Jr. – UEM

Jamil Constantin – UEM

Miriam Hiroko Inoue – UNEMAT

Sumário

1	Biologia de plantas daninhas.....	1
	<i>Alexandre Magno Brighenti e Maurílio Fernandes de Oliveira</i>	
2	Bancos de sementes e mecanismos de dormência em sementes de plantas daninhas.....	37
	<i>Alessandro de Lucca e Braccini</i>	
3	Métodos de manejo.....	67
	<i>Jamil Constantin</i>	
4	Controle biológico: aplicações na área de Ciência das Plantas Daninhas.....	79
	<i>Dauri José Tessmann</i>	
5	Alelopatia.....	95
	<i>Nádja de Moura Pires e Valter Rodrigues de Oliveira</i>	
6	Introdução ao controle químico.....	125
	<i>Rubem Silvério de Oliveira Jr.</i>	
7	Mecanismos de ação de herbicidas.....	141
	<i>Rubem Silvério de Oliveira Jr.</i>	
8	Resistência de plantas daninhas a herbicidas.....	193
	<i>Miriam Hiroko Inoue e Rubem Silvério de Oliveira Jr.</i>	
9	Absorção e translocação de herbicidas.....	215
	<i>Rubem Silvério de Oliveira Jr. e Marcos Antonio Bacarin</i>	
10	Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas	243
	<i>Rubem Silvério de Oliveira Jr. e Miriam Hiroko Inoue</i>	
11	Comportamento de herbicidas no ambiente.....	263
	<i>Maurílio Fernandes de Oliveira e Alexandre Magno Brighenti</i>	
12	Misturas de herbicidas contendo glyphosate: situação atual, perspectivas e possibilidades.....	305
	<i>Jamil Constantin e Rubem Silvério de Oliveira Jr.</i>	

Biologia de Plantas Daninhas

Alexandre Magno Brighenti
Maurílio Fernandes Oliveira

1. Introdução

Os termos “plantas invasoras”, “plantas daninhas” e “ervas daninhas” têm sido empregados indistintamente na literatura brasileira. Essas plantas são também designadas como plantas ruderais, plantas silvestres, mato ou inço. Entretanto, todos estes conceitos baseiam-se na sua indesejabilidade em relação a uma atitude humana. Um conceito amplo de planta daninha a enquadra como toda e qualquer planta que ocorre onde não é desejada. Com relação ao termo erva daninha, bastante utilizado, deveria ser evitado como termo geral, uma vez que implica em considerá-las como plantas herbáceas, o que não é totalmente verdadeiro. Pelo menos 20% das espécies daninhas não são herbáceas, sendo arbustivas ou até arbóreas, como a maioria das plantas daninhas de pastagens (Lorenzi, 1991). Embora não se possa dizer, a priori, se uma planta é ou não daninha, devido ao próprio conceito estabelecido levando em conta as atitudes humanas, algumas têm sido ditas plantas daninhas “comuns” e outras plantas daninhas “verdadeiras”. As plantas daninhas comuns são aquelas que não possuem habilidade de sobreviver em condições adversas. É o que ocorre, por exemplo, num sistema de semeadura direta com o binômio milho/soja, quando, na época da semeadura da leguminosa, ocorre a emergência de plantas de milho provenientes das sementes que não foram colhidas na safra anterior. Essas plantas são chamadas de voluntárias ou, popularmente, denominadas de “tiguera” ou “plantas guachas”. Por outro lado, as plantas daninhas verdadeiras apresentam determinadas características que permitem fixá-las como infestantes ou daninhas (Marinis, 1972). São plantas não melhoradas geneticamente, que apresentam capacidade de crescer em condições adversas, tais como ambientes desérticos ou alagados, em ambientes com temperaturas baixas ou altas e solos salinos. Apresentam rusticidade, resistência a pragas e doenças, habilidade de produzir grande número de sementes viáveis com adaptações que auxiliam na dispersão da espécie e formas variadas de multiplicação (tubérculos, estolões, rizomas e bulbos).

2. Origem e Evolução das Plantas Daninhas

A existência das plantas daninhas remonta da Antiguidade, quando as nossas plantas cultivadas viviam no estado silvestre. A domesticação das plantas úteis foi muito lenta e inicialmente a sua exploração era extrativa. Nem mesmo a eliminação das plantas daninhas que cresciam junto à cultura era realizada, pois, uma vez que possuíam agressividade, eram capazes de sobreviver nestas condições, sem sofrerem prejuízos decorrentes da concorrência.

O homem, com o passar do tempo, veio melhorando as espécies úteis, retirando-lhes gradativamente a agressividade necessária para viverem sozinhas. A natureza, por sua vez, agiu sobre as plantas silvestres imprimindo-lhes uma seleção no sentido de torná-las cada vez mais eficientes quanto à sobrevivência.

Acredita-se, também, que as plantas daninhas originaram-se, inicialmente, com distúrbios naturais tais como glaciações, desmoronamentos de montanhas e a ação de rios e mares (Muzik, 1970).

Na realidade, as plantas daninhas surgiram quando o homem iniciou suas atividades agrícolas, separando as benéficas (plantas cultivadas) das maléficas (plantas daninhas). De maneira que as plantas daninhas encontram-se onde está o homem, porque é ele que cria o ambiente favorável a elas. O homem é, provavelmente, o responsável pela evolução das plantas daninhas, bem como das plantas cultivadas.

Baker (1974) descreveu a influência do homem na evolução das plantas daninhas propondo três teorias: (i) espécies selvagens foram se adaptando e sendo selecionadas pelo contínuo distúrbio do habitat; (ii) hibridações entre espécies selvagens e raças cultivadas de espécies domesticadas e (iii) espécies que foram abandonadas no processo de domesticação.

Dentre as formas de coevolução das plantas daninhas com as plantas cultivadas destacam-se a mimetização das plantas daninhas com as culturas, a mudança da flora em função da pressão de seleção causada pelos métodos de controle e a resistência de plantas daninhas a herbicidas.

A mimetização das plantas daninhas e plantas cultivadas é caracterizada pela semelhança entre estas espécies. Quanto maior a semelhança, maior será a dificuldade de controle. Um exemplo típico ocorre com a cultura do arroz e o capim-arroz (*Echinochloa* spp.). Nesta mesma situação, encontram-se o arroz vermelho e o arroz cultivado, ambos *Oryza sativa* (Barret, 1983).

À medida que as práticas culturais mudam, as espécies de plantas daninhas menos adaptadas a estas práticas tendem a diminuir ou desaparecer, ao passo que as mais adaptadas que, normalmente, estavam em menor frequência no início, passam a dominar a área (Radosevich et al., 1997). Um exemplo característico é o que vem acontecendo com as culturas geneticamente modificadas, como a soja transgênica resistente ao glyphosate.

Mesmo sendo um herbicida que controla um grande número de espécies daninhas, existem outras com alto grau de tolerância ao glyphosate como a trapoeraba (*Commelina benghalensis*), a corda-de-violão (*Ipomoea* spp.), a erva-de-touro (*Tridax procumbens*), o agriãozinho (*Synedrellopsis grisebackii*) e outras.

Repetidas aplicações de um mesmo herbicida ou herbicidas de mesmo mecanismo de ação podem causar uma pressão de seleção em indivíduos resistentes, que ocorrem em baixa frequência. O favorecimento do aumento da população de biótipos de espécies daninhas resistentes por meio da pressão tende a tornar tais biótipos dominantes na população (Christoffoleti et al., 2008).

3. Aspectos Positivos e Negativos das Plantas Daninhas

3.1 Aspectos positivos

As plantas daninhas não devem ser vistas sempre como inimigas ou indesejáveis. Muitas vezes, devem ser encaradas como aliadas. As características benéficas encontradas nas espécies podem ser muitas, sendo a descoberta destas utilidades o objetivo de muitos estudos científicos.

A proteção do solo contra a erosão é um dos aspectos mais significativos das plantas daninhas. Também, a cobertura do solo é importante no sistema de semeadura direta, utilizando-se, neste caso, plantas como o milheto (*Pennisetum americanum*) (Ruedell, 1995). Outro ponto favorável a ser considerado é que quando se controlam as plantas daninhas por métodos manuais, mecânicos ou químicos, a cobertura morta sobre o solo reduz o aquecimento da superfície pela radiação solar e auxilia a retenção de umidade. Essa cobertura morta, quando em decomposição, incrementa os teores de matéria orgânica e nutrientes do solo. Pode, ainda, reduzir a germinação de novas plantas daninhas, tanto pelo efeito físico de sombreamento do solo quanto pela liberação de substâncias químicas com efeito alelopático.

Espécies de leguminosas como *Desmodium* spp., *Crotalaria* spp. e *Stylosanthes* spp. fixam nitrogênio através de bactérias em simbiose, elevando os teores disponíveis deste nutriente para as plantas. Além disso, espécies como o feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*) e a crotalária podem ser utilizadas como adubação verde.

As algas, por exemplo, são organismos aquáticos que surgiram muito antes das plantas terrestres. No Brasil, podem ser encontradas algas dos gêneros *Chlorella* e *Pithophora* em diversos ambientes aquáticos. Servem de alimento a vários organismos pois fazem parte do plâncton vegetal. São ricas em vitaminas e sais minerais, tendo cerca de 65% de proteínas, com praticamente todos os aminoácidos. Preparados desidratados de algas podem ser acrescidos às farinhas e alimentos. Também a azola apresenta aspectos positivos. Esta vive em simbiose com a bactéria *Anabaena azolla*,

que fixa N_2 da atmosfera, sendo utilizada na alimentação de animais e enriquecimento do solo.

Muitas plantas são apreciadas na ornamentação de aquários e lagos. Em coleções de água, espécies como o pinheirinho d'água (*Myriophyllum aquaticum*) e a alface d'água (*Pistia stratiotes*) oferecem proteção para os peixes, além de servirem de alimento para animais aquáticos. Essa espécie tem sido utilizada como alimento no confinamento do peixe-boi da Amazônia (Kissmann, 1997).

Outras espécies de plantas fornecem óleos essenciais utilizados em perfumaria como o patchouli (*Pogostemon patchouli*) e a lavanda (*Lavandula* spp). Também, certos medicamentos são produzidos a partir de espécies vegetais. Xaropes contra ataques de asma são processados a partir do rubim (*Leonurus sibiricus*). Macerações e infusões feitas a partir do cordão-de-frade (*Leonotis nepetaefolia*) têm sido usadas em banhos para cura de doenças. Extratos e chás de certas espécies relaxam a musculatura. A malva (*Malva parviflora*) é muito utilizada na farmacopéia popular devido a sua propriedade antiinflamatória. Extratos de raízes de língua-de-vaca (*Rumex obtusifolia*) são utilizados como laxativos. Chás de carqueja (*Baccharis trimera*) estimulam o aparelho digestivo. Além disto, esta espécie possui uma substância denominada lactona que tem ação contra cercárias de *Schistosoma mansoni*. As lactonas também têm ação letal sobre *Biomphalaria glabrata*, hospedeiro do *S. mansoni*. Também inibem o crescimento do *Tripanosoma cruzi*, protozoário causador da Doença de Chagas.

As plantas daninhas são fontes opcionais de vitaminas, sais minerais e amido. Muitas delas podem ser incluídas em nossa mesa e são apreciadas desde longa data como a beldroega (*Portulaca oleracea*), a serralha (*Sonchus oleraceus*) e o caruru (*Amaranthus retroflexus*). Doces, geléias e tortas podem ser feitos por meio dos frutos da amora-brava e joá-de-capote, plantas daninhas típicas de pastagens. Dos rizomas da taboa são feitas farinhas utilizadas como alimento humano em épocas de escassez de alimentos. Sementes do fedegoso são utilizadas na produção de uma bebida que pode substituir o café em algumas regiões do Brasil (Brandão et al., 1985a). A tiririca (*Cyperus esculentus*), considerada uma das plantas daninhas mais indesejáveis, apresenta algumas utilidades. Seus tubérculos são comestíveis e deles são produzidos refrescos em países como a Espanha. Diversas espécies de cactos são aproveitadas para produção de frutos, os chamados “figos da Índia”. E em regiões secas do nordeste brasileiro, as palmas-forrageiras são bastante utilizadas na alimentação animal e, até mesmo, humana, durante a escassez de chuvas e falta de alimentos. Outras fornecem temperos para alimentação humana como a menta (*Mentha* spp.) e a sálvia (*Salvia officinalis*).

Várias espécies possuem características apícolas, podendo fornecer néctar (plantas nectaríferas) e pólen (plantas poliníferas) (Brandão et al.,

1985a). Algumas acumulam as duas funções sendo néctar-poliníferas. Devido a grande adaptabilidade das plantas daninhas às condições edafoclimáticas, podem ser cultivadas em diversas regiões objetivando a produção de néctar e pólen em períodos de escassez daquelas plantas tradicionalmente consideradas apícolas. Espécies, como a orelha-de-urso (*Stachys arvensis*), a trapoeraba (*Commelina benghalensis*), o assa-peixe (*Vernonia polyanthes*), a guanxuma (*Sida rhombifolia*), a poaia-branca (*Richardia brasiliensis*) e a nabiça (*Raphanus raphanistrum*) apresentam potencial melífero.

Algumas espécies são cultivadas por curiosidade e também por motivo de estudos científicos em função da capacidade de aprisionar e digerir pequenas formas de vida animal, como o mururé (*Utricularia reniformis*) (Kissmann, 1995).

A guanxuma (*Sida rhombifolia*), a malvinha (*Sida acuta*) e o carrapicho-da-calçada (*Triumfetta semitriloba*) apresentam aspectos positivos, devido à existência de fibras resistentes, semelhantes à juta, utilizadas para cordoaria.

As cordas-de-viola (*Ipomoea* spp.), o balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*) e a maria-gorda (*Talinum paniculatum*) são utilizadas como espécies ornamentais. Também os cactos são plantas de belo aspecto, possuindo valor ornamental.

Folhas secas e moidas de chumbinho (*Lantana camara*), distribuídas sobre batata armazenada, são utilizadas no controle de traças.

O sapé (*Imperata brasiliensis*) serve como cobertura de casas e abrigos rústicos devido à decomposição lenta e o formato regular de suas folhas. Plantas de capim-rabo-de-burro (*Andropogon bicornis*) são muito usadas em coberturas de construções rurais e enchimento de cangalhas e camas de animais (Kissmann, 1991). Painas com fibras sedosas de frutos do oficial-de-sala (*Asclepias curassavica*) são, também, muito utilizadas para enchimento de almofadas.

Algumas espécies de gramíneas são tidas como excelentes forrageiras. O capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* e *B. brizantha*) e o capim-colonião (*Panicum maximum*) possuem alto valor nutricional quando utilizados como alimento para o gado, além de suportar o pisoteio dos animais. Na Amazônia, esta forrageira é utilizada na alimentação do peixe-boi, quando em cativeiro. O mentrasto (*Ageratum conyzoides*) abriga uma espécie de ácaro (*Amblyseius newsami*) predadora do ácaro vermelho dos citros (*Panonychus citri*), ocorrendo menor incidência destes insetos nos pomares cítricos, quando na presença desta espécie vegetal, podendo ser utilizado em programas de manejo integrado de pragas.

As plantas daninhas representam, também, um imenso banco de germoplasma que pode ser explorado para fins de melhoramento genético.

3.2 Aspectos negativos

Apesar de se constatar inúmeras utilidades em algumas espécies daninhas, outras interferem na saúde do homem e nas suas atividades, causando sérios prejuízos. Diretamente, elas podem afetar a saúde humana por causarem intoxicações alimentares como a flor-das-almas (*Senecio brasiliensis*) e comigo-ninguém-pode (*Dieffenbachia maculata*). A mamona (*Ricinus communis*) apresenta nas suas sementes uma substância chamada ricina que, quando ingerida por crianças e adultos em quantidades elevadas, pode levar à morte. A ocorrência de alergias é comum na presença de pólen da grama-seda (*Cynodon dactylon*), capim-massambará (*Sorghum halepense*), losna-branca (*Parthenium hysterophorus*) e capim-gordura (*Melinis minutiflora*). São também frequentes as dermatites e irritações da pele causadas por urtiga (*Jatropha urens*).

As espécies infestantes causam problemas em rodovias e ferrovias, reduzindo a visibilidade. Pessoas inescrupulosas podem atear fogo às plantas secas que margeiam as estradas, principalmente durante a época mais seca do ano, não raro provocando sérios acidentes. Em logradouros públicos, impedem a recreação infantil, além de servir como *habitat* para animais peçonhentos. Tiram a beleza de parques e jardins e podem reduzir o valor da terra em função da presença de espécies de difícil controle. O carrapicho beijo-de-boi ou pega-pega (*Desmodium* spp.) é comum em gramados, prejudicando sua estética e finalidade.

Terras infestadas com plantas daninhas de difícil controle, principalmente espécies perenes como a grama-seda (*Cynodon dactylon*), tem seu valor reduzido. Outras espécies perenes podem inviabilizar a exploração agrícola ou obrigar o agricultor a mudar de área, como no caso da tiririca (*Cyperus rotundus*) interferindo em áreas destinadas ao cultivo de olerícolas.

Espécies como o aguapé (*Eichhornia crassipes*) e a alface d'água (*Pistia stratiotes*) impedem a navegação e a recreação em mananciais aquáticos. Essas duas espécies são flutuantes livres, comuns em ambientes aquáticos. Devido a grande capacidade reprodutiva, podem causar efeitos indesejáveis caso não sejam manejadas adequadamente (Gelmini, 1996). A presença da taboa (*Typha angustifolia*) é indesejável em represas e lagos pois esta espécie invade toda a área, reduzindo as dimensões do espelho d'água, impossibilitando o seu uso para lazer e pescaria. Há casos em que a presença de algas, em grande número, causa problemas na utilização da água, conferindo-lhe sabor desagradável e tornando-a imprópria para o consumo humano e animal. As plantas aquáticas também são responsáveis pela proliferação do hospedeiro do agente causal da esquistossomose. Algumas plantas que acumulam água na sua base, como as espécies da família Bromeliaceae, podem hospedar insetos que transmitem doenças.

Em pastagens, as plantas daninhas interferem com as plantas forrageiras reduzindo a capacidade de lotação dos pastos. Espécies espinhosas

como o joá (*Solanum aculeatissimum*) e o arranha-gato (*Acacia plumosa*) podem ferir os animais; outras podem conferir sabor desagradável ao leite se ingeridas por animais em lactação. Plantas como o mio-mio (*Baccharis coridifolia*), a erva-de-rato (*Palicourea marcravi*), o oficial-de-sala (*Asclepias curassavica*) e a samambaia (*Pteridium aquilinum*) podem causar morte de bovinos quando pastejadas por animais recém chegados de áreas isentas destas plantas ou mesmo em épocas de escassez de alimentos.

Contudo, é mesmo na agricultura que as plantas daninhas causam os maiores danos econômicos. Em termos médios, 30% a 40% de redução da produção agrícola mundial é atribuída à interferência das plantas daninhas (Lorenzi, 1991). Além destes prejuízos diretos, a presença das plantas daninhas reduz a eficiência agrícola, aumentando os custos de produção. Causam danos às plantas cultivadas muito maiores que pragas e doenças e constituem-se na maior barreira à produção de alimentos, em muitas regiões do mundo (Muzik, 1970).

Infestações severas de corda-de-viola (*Ipomoea* spp.) e balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*) dificultam ou, até mesmo, impedem a operação de colheita. Os efeitos sobre a qualidade do produto obtido também são bastante importantes. A qualidade dos grãos diminui quando se colhe o produto juntamente com as plantas daninhas, pois ocorre elevação da umidade e redução da qualidade e da capacidade de armazenamento. Em estudos realizados por Campo et al. (1983), verificam-se os efeitos prejudiciais da infestação de amendoim-bravo em relação ao aumento da umidade de grãos de soja. A umidade dos grãos aumentou de 9,62% para 21,10%, quando o nível de infestação de amendoim-bravo passou de zero para 48 plantas m⁻², respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Teor de umidade e rendimento da soja em função da densidade de infestação de plantas de amendoim-bravo (*E. heterophylla*) (plantas m⁻²). Fonte: Campo et al. (1983).

Níveis de Infestação	Número de plantas de amendoim-bravo	Umidade dos grãos de soja (%)	Rendimento da cultura (kg ha ⁻¹)
0	0	9,62	2555
I	6	15,87	2390
II	17	16,10	2447
III	48	21,10	1678

Além disto, as sementes de plantas daninhas constituem-se em impurezas, devido às misturas mecânicas, reduzindo o valor cultural.

As plantas daninhas são demasiadamente agressivas e várias são as características que expressam essa agressividade. Possuem elevada ca-

pacidade de produção de sementes viáveis e adaptações especiais para disseminá-las, facilitando a dispersão. São plantas que possuem elevada capacidade de competição e atributos específicos que asseguram a perpetuação, tais como dormência e germinação desuniforme. Algumas espécies perenes multiplicam-se, ainda, por diversas maneiras, como no caso da tiririca (*Cyperus rotundus*).

A competição é a forma mais conhecida de interferência das plantas daninhas sobre as culturas. Os recursos que mais frequentemente estão sujeitos à competição são nutrientes minerais essenciais, água, luz e espaço. Certas espécies interferem alelopaticamente sobre as plantas cultivadas, causando sérios prejuízos ao seu crescimento, seu desenvolvimento e sua produtividade.

Em soja, algumas espécies se destacam pelo dano que causam à cultura. Uma delas é o amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*). Essa planta daninha é uma das mais temidas pelos produtores de soja devido à dificuldade de controle. É bastante frequente em todo o Brasil e sua semente germina durante quase todo ano, havendo períodos de maior intensidade em épocas quentes. Emergem a profundidades de até 12 cm, possuindo extraordinária capacidade de multiplicação. Crescem com rapidez, sombreando culturas anuais de crescimento mais lento. Competem intensivamente na absorção de nutrientes e, sendo rica em látex, na colheita de culturas infestadas, ocorre contaminação que permite a fixação de impurezas. A presença desta espécie na cultura da soja causou decréscimo na produtividade da cultura que variou de 2310 a 1376 kg ha⁻¹ para as densidades de 0-10 e 61-70 plantas de amendoim-bravo m⁻², respectivamente (Gazziero et al., 1998).

Outra espécie que recentemente vem se espalhando em diversas regiões produtoras de soja é o balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*). Assume grande importância econômica nas lavouras de soja do Sul do Brasil (Voll et al., 1998a). É uma espécie que se instala, preferencialmente, em locais menos perturbados pela ação do homem como linhas de cerca, pomares, terrenos baldios e lavouras perenes. Entretanto, com a expansão da semeadura direta, esta espécie vem preocupando os agricultores pela dificuldade de controle. Além disto, são plantas trepadeiras, possuindo estruturas denominadas gavinhas, que se fixam às plantas de soja, dificultando o processo de colheita.

Também o carrapicho beijo-de-boi ou desmódio (*Desmodium tortuosum*) é uma espécie de introdução recente nas diversas regiões produtoras de soja do Paraná e assume importância econômica quando se observa a cultura instalada no centro-oeste do Brasil (Voll et al., 1998b). Devido à existência de poucos herbicidas, registrados para a cultura da soja, que apresentam controle satisfatório do desmódio, a sua infestação vem aumentando consideravelmente nos últimos anos com séria ameaça a esta cultura.

O capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) e o capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*) são espécies daninhas gramíneas muito frequentes em culturas anuais e perenes no Brasil. São muito competitivas quando presentes em culturas anuais. Na cultura do algodão, as frutificações do capim-carrapicho se prendem às fibras, nos capulhos, havendo desvalorização do produto. Também podem provocar ferimentos em trabalhadores que colhem lavouras infestadas por esta espécie. O capim-amargoso (*Digitaria insularis*), quando desenvolvido, é evitado pelo gado por apresentar substâncias amargas, diminuindo o valor das pastagens. O capim-arroz (*Echinochloa crusgalli*) é uma espécie muito disseminada na cultura do arroz inundado e de várzea. É, também, hospedeira alternativa de *Piricularia oryzae*, agente causal da brusone do arroz, e hospedeira para diversas espécies de vírus causadores de doenças desta cultura, como o mosaico. Suas sementes são tidas como nocivas toleradas pela legislação brasileira e sua presença em lotes de sementes, acima de um determinado limite, impede a comercialização (Kissmann, 1991). O azevém (*Lolium multiflorum*) é muito competitivo quando infestante de lavouras de trigo. A trapoeraba (*Commelina benghalensis*) é hospedeira de nematóides como *Meloydogyne incognita*, *Pratylenchus pratensis* e do fungo *Piricularia grisea*, bem como hospedeira do vírus da roseta do amendoim e do mosaico do pepino (Brandão et al., 1985b).

4. Características das Plantas Daninhas

Em comunidades estabelecidas, as plantas daninhas possuem baixa capacidade em competir por recursos (nutrientes, água, luz e espaço), sendo encontradas, principalmente, em áreas onde a vegetação natural foi retirada. Essas espécies desenvolveram, ao longo do tempo, características que proporcionam a sobrevivência em ambientes sujeitos aos mais variados tipos e intensidades de limitações ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas. Essas características tornam-se um impedimento à obtenção de um controle eficiente de plantas daninhas, sendo chamadas de características de agressividade. As mais relevantes são as seguintes:

4.1 Habilidade competitiva

As plantas daninhas possuem maior habilidade que as plantas cultivadas no recrutamento de recursos do ambiente como nutrientes, luz, água e CO₂. Os teores de nitrogênio e potássio encontrados em amendoim-bravo e em beldroega, respectivamente, são superiores aos encontrados em plantas cultivadas. Desta maneira, vale ressaltar a prática de distribuição dos fertilizantes próximos ao sulco de semeadura, facilitando o acesso e a utilização dos nutrientes por parte da cultura. Na competição pela luz, as plantas daninhas apresentam desvantagem inicial, pois apresentam sementes pequenas e plântulas de porte baixo. Neste período, as plantas cultivadas

são mais altas e interceptam a luz com maior facilidade. Entretanto, as espécies daninhas apresentam grande capacidade de estiolamento quando sombreadas, fazendo com que rapidamente passem de uma situação de desvantagem para uma nova situação em que posicionam as suas folhas no mesmo nível ou acima das folhas da cultura, interceptando a radiação solar. A competição pela água é importante em situações em que a disponibilidade hídrica é limitada.

4.2 Capacidade de produção de propágulos

Vários são os propágulos pelos quais as plantas podem perpetuar-se, tanto por via seminífera (sementes), quanto por via vegetativa (bulbos, estolões, rizomas). As espécies daninhas produzem, de modo geral, grande quantidade de disseminulos, porém a produção pode variar amplamente entre as espécies.

O sucesso destas espécies depende principalmente do número e da viabilidade dos propágulos produzidos pelo indivíduo. Uma planta de capim-massaranduba ou sorgo-de-alepo (*Sorghum halepense*) pode produzir de 3 a 80 mil sementes, dependendo da consideração de uma planta como sendo um colmo ou todos os colmos emergidos a partir de um sistema de rizomas interligados. Num hectare totalmente infestado podem ser produzidos 220 kg de sementes de sorgo-de-alepo, ou seja, 55 milhões de sementes, numa temporada (Kissmann, 1997). Plantas de capim-barbicha-de-alemão (*Chloris polydactyla*), crescendo isoladamente, podem produzir cerca de 95 mil sementes por planta (Brighenti et al., 2007). Espécies como o caruru (*Amaranthus retroflexus*) podem chegar a produzir até 117 mil sementes por planta, enquanto *Artemisia biennis* pode produzir mais de 1 milhão de sementes por planta.

Com relação à tiririca, em um hectare altamente infestado, podem ser retiradas quatro toneladas de rizomas e tubérculos numa profundidade de 15-20 cm do solo (Brandão et al., 1985b). A Tabela 2 apresenta a quantidade de sementes produzidas por algumas espécies, crescendo isoladamente, e o número de sementes por quilograma. Pode-se observar que espécies que possuem sementes muito miúdas como o caruru, o quenopódio e a beldroega são, geralmente, mais prolíficas.

4.3 Desuniformidade do processo germinativo

Se a germinação das plantas daninhas fosse concentrada em um mesmo período, o controle seria facilitado. Porém, isto geralmente não acontece, pois estas espécies se valem de artifícios que lhes conferem desuniformidade no processo germinativo capaz de garantir a perpetuação. Dois aspectos podem ser salientados. O primeiro está relacionado aos mecanismos de dormência dos propágulos e o outro àquele relativo à distribuição deles no perfil do solo. Em função desta distribuição, ficam sujeitos a diferentes

Tabela 2. Número de sementes produzidas por planta e número de sementes por quilograma de algumas espécies de plantas daninhas. Fonte: Adaptado de Zimdahl (1999).

Nome Comum	Nome Científico	n ^o sementes planta ⁻¹	n ^o sementes kg ⁻¹
Capim-arroz	<i>Echinochloa crusgalli</i>	7.160	1.070.143
Maria-pretinha	<i>Solanum americanum</i>	8.460	592.173
Quenopódio	<i>Chenopodium album</i>	72.450	1.945.710
Caruru	<i>Amaranthus retroflexus</i>	117.400	3.584.211
Beldroega	<i>Portulaca oleracea</i>	53.300	10.476.924
Aveia-brava	<i>Avena sterilis</i>	250	77.739
Capim-carrapicho	<i>Cenchrus echinatus</i>	1.100	201.777
Guaxuma	<i>Sida spp.</i>	510	426.900

intensidades de estímulos necessários à quebra dos mecanismos de dormência.

O tempo pelo qual os propágulos das plantas daninhas mantêm sua viabilidade no solo é fruto da coexistência de inúmeros mecanismos de dormência. Se estas sementes não possuíssem grande longevidade, as medidas de controle representariam grande impacto sobre suas densidades populacionais e a erradicação das plantas seria relativamente fácil. Assim, a dormência evoluiu como um mecanismo de sobrevivência das espécies para determinadas condições climáticas. Em regiões de clima temperado, a maior ameaça à sobrevivência é o inverno. As sementes amadurecem na primavera, verão e outono. E se elas germinassem imediatamente, o inverno as surpreenderia em um estágio vulnerável de plântula e a espécie seria extinta.

A dormência pode ser definida como um processo pelo qual as sementes de determinadas espécies, mesmo sendo viáveis e tendo todas as condições ambientais para germinar, deixam de fazê-lo. Este estado de dormência não pode ser confundido com quiescência, que é um estado de repouso em que, estando viável a semente, ele é superável com o fornecimento das condições ambientais necessárias (Carvalho & Nakagawa, 1988).

Várias são as categorias em que se enquadram as sementes em função de sua incapacidade germinativa. Uma delas é o caso da ocorrência de embriões imaturos ou rudimentares, onde a semente já se desprende da planta mãe e o embrião não se encontra completamente desenvolvido. Este tipo de dormência é observado em carrapicho-de-carneiro (*Acanthospermum hispidum*). O embrião também pode estar dormente. As sementes enquadradas neste tipo são as que apresentam exigências especiais quanto à luz e ao resfriamento para superar a dormência. As sementes cuja germinação é afetada pela luz podem ter sua germinação promovida ou inibida

pela mesma. No primeiro caso, são chamadas fotoblásticas positivas e, no segundo, fotoblásticas negativas. Como exemplo de fotoblásticas negativas há o caruru (*Amaranthus caudatus*), cujas sementes submetidas a pequenas quantidades de radiação tem a germinação inibida em até 30% (Gutternan et al., 1992).

Também pode ocorrer impermeabilidade à água. Neste processo, o tegumento impede a absorção de água. Um exemplo típico deste fenômeno foi observado em fedegoso (Pitelli, 1988) e em algumas espécies das famílias Malvaceae, Chenopodiaceae, Convolvulaceae, Liliaceae e Solanaceae (Rolston, 1978).

Outro tipo de dormência é aquela onde estruturas como o pericarpo, o tegumento e as paredes celulares restringem as trocas gasosas. Essa causa de dormência é muito encontrada em espécies da família Poaceae. Este tipo de dormência também ocorre em espécies de *Xanthium* spp., onde o tegumento seminal não permite a passagem do oxigênio, podendo levar um longo período de tempo até que o tegumento seja afetado.

Podem ocorrer, ainda, restrições mecânicas oferecidas pelo tegumento das sementes, impedindo o crescimento do embrião. Este tipo de dormência é comum em espécies daninhas do gênero *Amaranthus* (caruru), *Lepidium* (mentruz) e *Brassica* (mostarda).

Devido a estes mecanismos, as sementes de plantas daninhas conseguem manter a capacidade de germinação mesmo quando enterradas durante vários anos no solo (Tabela 3). As sementes de figueira-do-inferno (*Datura stramonium*) apresentaram 90% de germinação após 17 anos de enterradas (Burnside et al., 1996).

Tabela 3. Porcentagem de germinação de sementes de algumas espécies de plantas daninhas enterradas a 20 cm de profundidade, durante 17 anos.

Fonte: Adaptado de Burnside et al. (1996).

Espécies	Anos após serem enterradas											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	17
	% de germinação											
<i>Echinocloa crusgalli</i>	17	3	58	39	42	31	9	14	4	4	2	0
<i>Setaria verticillata</i>	74	73	33	34	38	22	22	26	33	6	10	0
<i>Digitaria sanguinalis</i>	12	79	45	42	43	12	1	12	2	0	0	0
<i>Xanthium strumarium</i>	10	60	59	51	65	33	37	41	15	21	0	0
<i>Datura stramonium</i>	93	93	93	94	96	89	88	82	92	78	95	90
<i>Amaranthus retroflexus</i>	66	69	38	40	40	37	9	2	6	5	7	1
<i>Rumex crispus</i>	76	92	93	85	70	74	94	84	91	22	73	61
<i>Taraxacum officinale</i>	2	12	5	10	1	1	2	4	0	0	0	0

4.4 Capacidade de germinar e emergir a grandes profundidades

Algumas espécies desenvolveram a capacidade de germinar e emergir a partir de grandes profundidades no perfil do solo. Tubérculos de tiririca (*Cyperus rotundus*), plantados em tubos de PVC a diferentes profundidades, emergiram, até mesmo quando colocados a um metro abaixo da superfície (Brighenti et al., 1997).

Sementes de aveia silvestre (*Avena fatua*) conseguem germinar até 17,5 cm de profundidade e amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) emergem acima de 12 cm. As sementes de trapoeraba (*Commelina benghalensis*), formadas a partir dos rizomas, são capazes de germinar desde uma profundidade de 12 cm, enquanto que sementes produzidas na parte aérea não germinam em profundidades maiores que 2 cm (Kissmann, 1997).

4.5 Viabilidade dos propágulos em condições desfavoráveis

Para sobreviver, as plantas daninhas desenvolveram características que mantêm suas estruturas de propagação vivas, mesmo em ambientes, ou épocas do ano, com determinadas limitações de recursos como luz, água, temperatura. Sementes de campainha (*Convolvulus arvensis*) conseguem manter-se vivas mesmo após 54 meses de imersão em água. Algumas sementes também conseguem manter-se viáveis após passar pelo trato intestinal de bovinos e de suínos, equinos e ovinos, mas perdem a viabilidade após passar pelo trato intestinal de galinhas. Entretanto, sementes de *Abutilon theophrasti* conseguem manter alguma viabilidade após passar pelo trato intestinal de galinhas.

Sementes de *Euphorbia esula* passaram pelo trato digestivo de ovelhas e cabras. Foram recuperados 18% das sementes no material fecal, com ainda 2% de germinação nas que passaram pelo trato digestivo de ovelhas e 16% nas que passaram pelas cabras (Tabela 4).

Tabela 4. Percentagem de germinação e viabilidade de sementes de *Euphorbia esula* após passar pelo trato digestivo de ovelhas e cabras.

Fonte: Lacey et al. (1992).

Tratamentos	Recuperação (%)	Germinação (%)	Viabilidade (%)
Controle	-	72	90
Ovelhas	18	02	14
Cabras	18	16	31

4.6 Mecanismos alternativos de reprodução

A capacidade reprodutiva das plantas daninhas é uma de suas principais características de agressividade. As plantas daninhas perenes podem se reproduzir tanto por sementes quanto vegetativamente. Existem vários

tipos de estruturas de propagação vegetativa nas plantas daninhas tais como:

- Estolão ou estolho: é um caule que se desenvolve formando raízes adventícias e parte aérea na região dos nós. Um exemplo característico é a grama-bermuda (*Cynodon dactylon*).
- Rizoma: é um caule subterrâneo que produz raízes adventícias e parte aérea. Como exemplo pode-se mencionar o capim-massambará (*Sorghum halepense*), a samambaia (*Pteridium aquilinum*), a losna-brava (*Artemisia verlotorum*) e outras.
- Tubérculo: é a porção terminal de um rizoma. Possui uma grande quantidade de reservas e gemas. A tiririca (*Cyperus rotundus*) é uma espécie daninha que apresenta propagação por tubérculos.
- Bulbos: são gemas subterrâneas modificadas, consistindo de caule e folhas. As reservas estão contidas nas folhas. Um exemplo de plantas daninhas que se multiplicam por meio de bulbos destaca-se o trevo (*Oxalis latifolia*) e o alho-bravo (*Nothoscordum inodorum*).
- Caules: algumas espécies daninhas possuem a capacidade de rebrotar, a partir de caules. As guanxumas, quando cortadas, por exemplo, com uso de roçadeiras, podem rebrotar.

Plantas como a tiririca (*Cyperus rotundus*), além da reprodução semínifera (sementes), apresentam reprodução vegetativa por meio dos rizomas, tubérculos e bulbos basais (Figura 1).



Figura 1. Estruturas de propagação da tiririca (*Cyperus rotundus*): semínifera (esquerda) e vegetativa (direita).

A trapoeraba (*Commelina benghalensis*) apresenta uma característica peculiar com reprodução por sementes subterrâneas formadas nos rizomas.

Flores modificadas ocorrem em rizantógenos (rizomas subterrâneos), formando frutos e sementes verdadeiras por partenocarpia, sendo estas maiores que aquelas formadas a partir de flores na parte aérea da planta. Também pode ocorrer enraizamento a partir de nós dos ramos de trapoeraba em contato com o solo (Kissmann, 1989). A grama-seda (*Cynodon dactylon*) se reproduz por meio de estolões. O capim-mão-de-sapo (*Dactyloctenium aegyptium*) possui reprodução por sementes e estolões. Capim-capivara (*Hymenachne amplexicaulis*) se propaga tanto por sementes como por pedaços de caules enraizados (Lorenzi, 1991). Também a losna (*Artemisia verlotorum*) é uma espécie de difícil controle, pois além das sementes, possui caule subterrâneo (rizoma) que garante a sua perpetuação. Após o corte da parte aérea, ocorre uma rápida rebrota dos rizomas povoando a área. Em regiões onde se utiliza agricultura mecanizada ocorre disseminação destes rizomas movimentados pelos implementos agrícolas (Brighenti et al., 1993). As plantas de losna originadas de sementes são muito pequenas e frágeis no início de sua formação, entretanto, aquelas provenientes dos rizomas emergem com muito vigor e agressividade. Este aspecto dificulta o controle, principalmente, no caso de se optar pelo controle químico. Na Figura 2 observa-se área altamente infestada com losna-brava (*Artemisia verlotorum*) e sua principal estrutura de propagação que são os rizomas.



Figura 2. Área infestada (esquerda) e rizoma (direita) da losna-brava (*Artemisia verlotorum*).

4.7 Facilidade de disseminação dos propágulos

Os propágulos, uma vez produzidos, apresentam diferentes métodos de dispersão no espaço. Caso os disseminulos das plantas daninhas caíssem próximos à planta produtora, apenas pela ação da gravidade, e não se movessem a grandes distâncias, seria mais fácil o controle das espécies infes-

tantes. Porém, os propágulos, uma vez produzidos, apresentam diferentes métodos de dispersão no espaço.

As estruturas de propagação das plantas daninhas são, sem dúvida, um dos mais importantes fatores de agressividade destas espécies, podendo ocorrer por meios próprios (autocoria) ou com auxílio de agentes externos (alocoria).

No primeiro caso, os frutos caem no solo ou se abrem liberando suas sementes. É o caso de espécies de gramíneas com sementes grandes como o capim-arroz (*Echinochloa* spp.) e o arroz-vermelho (*Oryza sativa*). Outras espécies lançam suas sementes a distâncias relativamente grandes como a mamona (*Ricinus communis*), o quebra-pedra (*Phyllanthus tenellus*) e o amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*). No caso desta última, as sementes podem ser lançadas a distâncias que variam de dois a cinco metros.

No segundo caso, a dispersão é auxiliada por meios externos, podendo ser classificada segundo o agente de dispersão:

Disseminação hidrócora: é aquela que ocorre por meio da água de chuvas, córregos, rios, inundações, abrangendo todos os casos de disseminações pela água. Wilson (1980) encontrou sementes de 77 espécies daninhas em um canal principal de irrigação, quando analisou duas seções do canal, coletando um total de 30.346 sementes. Havia 26 vezes mais sementes no final do canal de irrigação do que no início. A maioria destas sementes flutuava, sendo o caruru (*Amaranthus retroflexus*) aquela de maior frequência, representando 40% do total de sementes. Este mesmo autor estimou que um milhão e duzentas mil sementes por hectare eram introduzidas nas áreas de irrigação a cada ano. Deste modo, a execução correta de um manejo de plantas daninhas nos reservatórios de água, bem como nos canais de irrigação, é fator primordial para se evitar a introdução de sementes de espécies daninhas em áreas irrigadas.

Disseminação anemócora: é aquela onde os propágulos são carregados pelo vento, podendo apresentar adaptações como as da couvinha (*Porphyrillum ruderale*) que possuem aquênios com papilhos pilosos, facilmente transportados pelo vento. Outras espécies que possuem sementes disseminadas pelo vento são a erva-de-touro (*Tridax procumbens*) e o oficial-de-sala (*Asclepias curassavica*). Suas sementes apresentam tufo de pelos sedosos, que facilitam a dispersão pelo vento (Kissmann, 1992). Sementes leves e pequenas como as do caruru (*Amaranthus* spp.) e da beldroega (*Portulaca oleracea*) têm sua disseminação aumentada pela ação da força eólica, sendo distribuídas a longas distâncias. Em geral, espécies daninhas da família Asteraceae apresentam estruturas de adaptação das sementes que confere dispersibilidade pelo vento.

Disseminação zoócora: é o transporte de propágulos pelos animais. Quando o propágulo é transportado externamente ao corpo do animal é chamada epizóica, como a que ocorre comumente, por exemplo, com capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*), carrapicho-de-carneiro (*Acanthospermum*

hispidum), picão-preto (*Bidens pilosa*) e também o carrapichão (*Xanthium strumarium*). Zimdahl (1999) menciona que o velcro foi inventado por George Mestral em 1941, a partir de uma observação feita em suas caçadas nas montanhas suíças. Verificou que os frutos do carrapichão ficavam aderidos em suas roupas, bem como nos pelos do seu cachorro. A partir de uma minuciosa visualização da morfologia dos espinhos contidos no fruto, desenvolveu o velcro.

Quando o propágulo é ingerido e transportado dentro do corpo do animal, sendo expelido pelas fezes, a disseminação é denominada endozóica. Um exemplo ocorre com a grama-batatais (*Paspalum notatum*) quando suas sementes são ingeridas por bovinos. Também os pássaros ingerem sementes de plantas daninhas transportando-as a grandes distâncias.

Entretanto, o homem é o principal disseminador de plantas daninhas entre diferentes regiões e países. Essa forma de disseminação é denominada de antropócora. Muitas espécies foram introduzidas voluntariamente pelas pessoas com finalidades econômicas ou ornamentais. Temos como exemplo o capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) trazido da África para o Brasil para servir como forrageira. Também o capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) foi introduzido no Brasil trazido em navios negreiros. As folhas desta espécie serviam de camas para os escravos. Os navios ao chegarem ao Brasil, eram limpos e as sementes contidas no meio da palha iniciaram a disseminação da espécie no território brasileiro (Kissmann, 1997). O capim-arroz (*Echinochloa* spp.) é um dos exemplos mais importantes de disseminação ocorrida em função de sua estrutura de propagação estar misturada às sementes do arroz cultivado.

Apesar dos avanços na área agrícola no que diz respeito às máquinas utilizadas em todo o processo, ainda hoje estes equipamentos são responsáveis pela dispersão de sementes de plantas daninhas. As colhedoras utilizadas em áreas destinadas à produção de sementes devem ser limpas com critério para evitar a contaminação de novas áreas de cultivo e também de lotes de sementes. Embora se recomende a utilização de sementes certificadas, fato que garante um reduzido número de lotes de sementes cultivadas contaminadas com sementes de espécies daninhas, este problema ainda persiste. É importante lembrar que um programa adequado de manejo de espécies infestantes começa com a aquisição de sementes das culturas isentas das sementes de plantas daninhas.

4.8 Crescimento e desenvolvimento inicial

A ocupação rápida e efetiva do ecossistema agrícola é outro atributo muito importante no ciclo de vida das plantas daninhas. Assim, aquela espécie que ocupar primeiro o espaço, pode vencer no processo competitivo. Certas espécies que possuem o metabolismo fotossintético C₄ têm maior habilidade em retirar do meio os fatores necessários aos seus crescimento e desenvolvimento quando comparadas a plantas de metabolismo C₃. As espécies

que possuem metabolismo C_4 são mais eficientes na utilização do CO_2 atmosférico, conferindo-lhes, por conseguinte, maior taxa de crescimento por unidade de tempo, maior eficiência em produzir biomassa seca com utilização de menores quantidades de água e melhor aproveitamento da energia luminosa. Como exemplo de plantas daninhas com metabolismo fotossintético C_4 , há a tiririca, o amendoim-bravo, o caruru, o capim-amargoso, o capim-mão-de-sapo, o capim-marmelada e a grama-seda.

5. Classificações das Plantas Daninhas

A sistemática ou taxonomia é a parte da ciência que trata da classificação dos seres vivos. No caso das plantas daninhas, a classificação é fundamental para a ciência e controle das mesmas. Utilizam-se chaves classificatórias que levam em consideração características da planta adulta e, principalmente, detalhes florais. No que se refere à ciência das plantas daninhas, torna-se importante o conhecimento das espécies, na fase inicial de crescimento, para que haja êxito no controle. Assim, é fundamental o reconhecimento de espécies daninhas no estágio de plântulas, quando estas emitem as primeiras folhas. Vários livros apresentam as espécies, fotografadas em diversas fases do seu crescimento e seu desenvolvimento, com o intuito de auxiliar na identificação. Algumas plantas daninhas pertencem às mesmas classes, ordens, famílias, gêneros e, em certos casos, até a mesma espécie que algumas plantas cultivadas (exemplo: arroz vermelho e arroz cultivado, ambos *Oryza sativa*).

O sistema de classificação adotado pelo botânico Cronquist apresenta diferenças em relação aos sistemas utilizados tradicionalmente (Deuber, 1992). Alguns nomes importantes, com relação à família das plantas, foram modificados e as três sub-famílias da família Leguminosae passaram a se constituir famílias como mostrado na Tabela 5:

Tabela 5. Classificação das famílias segundo os sistemas Engler-Wettstein e Cronquist.

Sistema Engler-Wettstein	Sistema Cronquist
Família Compositae	Família Asteraceae
Família Cruciferae	Família Brassicaceae
Família Gramineae	Família Poaceae
Família Leguminosae	
Sub-família Caesalpinoideae	Família Caesalpinaceae
Sub-família Mimosoideae	Família Mimosaceae
Sub-família Papilionoideae	Família Papilionaceae

A nomenclatura das plantas é assunto bastante controverso. Deste modo, o mais importante na ciência das plantas daninhas é saber reconhe-

cer os gêneros e as espécies para decidir sobre o melhor método de controle a ser adotado.

Outra classificação das plantas daninhas surgiu com o aparecimento dos primeiros herbicidas orgânicos, derivados dos ácidos alifáticos e fenoxiacéticos, separando-as em dois grandes grupos, as plantas daninhas de “folhas largas” e as de “folhas estreitas”, devido ao fato destes produtos possuírem ação eficiente sobre gramíneas e dicotiledôneas, respectivamente (Schultz, 1968). As “folhas largas” são tidas como plantas de limbo foliar largo, nervação dos tipos palminérvia, peltinérvia e peninérvia; o segundo grupo, as plantas daninhas de “folhas estreitas”, inclui aquelas de nervação dos tipos uninérvia e paralelinérvia e, raramente, curvinérvia. Neste agrupamento, estão, especialmente, gramíneas e ciperáceas. Entretanto, este conceito não é muito adequado, pois poucos herbicidas podem ser considerados específicos ou seletivos dentro de distintos níveis classificatórios do ponto de vista botânico.

Outro critério de classificação das plantas daninhas consiste em separá-las em terrestres e aquáticas. As plantas daninhas terrestres são classificadas, principalmente, de acordo com o local de ocorrência, de acordo com o ciclo de desenvolvimento e hábito vegetativo.

Quanto ao local de ocorrência podem ser classificadas como arvenses, ruderais e viárias. As arvenses são plantas que infestam culturas agrícolas e pastagens. As ruderais ocupam locais de atividade humana, porém áreas não agrícolas, tais como terrenos baldios, áreas industriais e linhas de rede elétrica. As viárias são aquelas que ocorrem ao longo dos caminhos.

Quanto ao ciclo de desenvolvimento, as plantas daninhas podem ser classificadas em plantas monocárpicas ou policárpicas. As monocárpicas florescem e frutificam encerrando seu ciclo de vida e permanecendo no solo na forma de propágulos. Dividem-se em anuais e bianuais. As anuais florescem e frutificam em períodos inferiores a um ano. Constituem a grande maioria e as mais importantes das espécies daninhas do Brasil e têm ciclo de vida que varia de 40 a 160 dias. Podem ser divididas ainda em anuais de verão e anuais de inverno. As anuais de verão germinam normalmente na primavera e vegetam durante todo o verão, produzindo suas sementes durante o outono e terminando seu ciclo de vida antes da entrada do inverno. Com exemplo, pode-se destacar o caruru (*Amaranthus retroflexus*), o capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) e o capim-colchão (*Digitaria horizontalis*). É evidente que a infestação destas espécies não fica restrita à época caracterizada pelas anuais de verão, podendo encontrá-las em outras épocas do ano, porém em baixas intensidades de infestação. As anuais de inverno, geralmente germinam durante o outono/inverno, desenvolvem-se durante a primavera e produzem sementes durante o verão. Temos como exemplo a nabiça (*Raphanus raphanistrum*) e o mentruz (*Lepidium virginicum*).

As bianuais completam seu ciclo de vida em um período superior a um ano e inferior a dois anos. Geralmente, desenvolvem-se vegetativamente no primeiro ano, florescendo e frutificando no segundo ano. Normalmente, germinam durante a primavera/verão e desenvolvem vegetativamente durante todo o outono/inverno, florescendo apenas após a primavera/verão do ano seguinte. São poucas as espécies bianuais existentes no Brasil, sendo mais comuns em países de clima temperado. Podem ser, ainda, bianuais ou anuais (*Leonurus sibiricus*) e bianuais ou perenes (*Boerhavia diffusa*), dependendo das condições climáticas e época de germinação.

As plantas policárpicas vivem durante vários anos, produzindo propágulos em várias estações (plantas perenes). Podem ser divididas em plantas perenes simples e complexas. As perenes simples propagam-se exclusivamente por meio de sementes e as complexas por meio de sementes e órgãos de propagação vegetativa.

Quanto ao habitat as plantas daninhas podem ser classificadas como terrestres, parasistas e aquáticas. As terrestres podem ser subdivididas em plantas daninhas de áreas agrícolas, áreas de pastagens e florestas e ainda classificadas como herbáceas, sub-arbustivas, arbustivas, arbóreas, trepadeiras, epífitas e hemiepífitas. As herbáceas são plantas de porte pequeno, com altura ou diâmetro de copa inferior a 1,0 m, para plantas eretas ou prostradas, respectivamente. São plantas, em geral, com caules não lignificados. Mentrastó (*Ageratum conyzoides*) e espérgula (*Spergula arvensis*) são exemplos de espécies herbáceas. As sub-arbustivas apresentam porte variando de 0,80 a 1,50 m de altura, possuindo caules lenhosos e hábito ereto. Exemplos de sub-arbustivas são cheirosa (*Hyptis suaveolens*) e fedegoso (*Senna obtusifolia*). As arbustivas apresentam caule de hábito ereto, são lenhosas e porte variando de 1,50 a 2,50 m como a fruta-de-lobo (*Solanum lycocarpum*). As arbóreas possuem as mesmas características, mas com porte acima de 2,5 m, como a embaúba (*Cecropia peltata*). As espécies daninhas trepadeiras são plantas que utilizam outras como suporte e se dividem em volúveis e cirríferas. As volúveis sobem por enrolamento como a corda-de-violão (*Ipomoea hederifolia*) e o cipó-de-viado (*Polygonum convolvulus*). As cirríferas prendem-se ao suporte por meio de gavinhas como o balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*) e o melão-de-são-caetano (*Momordica charantia*). As plantas epífitas são aquelas que vivem sobre outras plantas, afastadas do solo, mas não são parasitas, como as bromélias, orquídeas e samambaias. Plantas hemiepífitas são aquelas que, no início do crescimento, utilizam outras como suporte e, posteriormente, suas raízes alcançam o solo como, por exemplo, o mata-pau (*Caussopa schotii*).

Com relação às plantas parasitas, elas podem ser divididas em parasitas da parte aérea e parasitas do sistema radical.

As parasitas da parte aérea podem ser classificadas como holoparasitas e hemiparasitas. As primeiras não contém clorofila e dependem para

sobrevivência de nutrientes obtidos por parasitismo, ou seja, vivem exclusivamente à custa do hospedeiro, como, por exemplo, o cipó-chumbo (*Cuscuta racemosa*). No Brasil, esta espécie infesta, principalmente culturas de cebola e alfafa, além de espécies ornamentais como a coroa-de-Cristo. As hemiparasitas são clorofiladas e capazes de realizar fotossíntese como a erva-de-passarinho (*Struthanthus* spp.), bastante prejudicial em cultivos de citros e árvores ornamentais. Suas sementes são disseminadas por meio de aves que apreciam seus frutos. Porém, as sementes não são digeridas pelas aves, sendo expelidas nas fezes, e germinam em outras plantas. Os frutos, por apresentarem certa viscosidade, aderem-se às penas das aves, facilitando a propagação para outras árvores.

As parasitas do sistema radicular, até o momento, não foram registradas no Brasil. Dentre elas, destaca-se as do gênero *Striga* (erva-de-bruxa) e o orobanche (*Orobanche*).

No caso das plantas daninhas aquáticas, estas podem ser divididas em três grandes grupos (algas, submersas e macrófitas).

As algas podem ser unicelulares (microscópicas) ou pluricelulares (filamentosas). Pequenas infestações em corpos de água podem ser benéficas, servindo de alimento para peixes. No entanto, grandes infestações, chamadas de “água podre”, dificultam o uso da água.

As plantas aquáticas submersas aproveitam a luz difusa (exemplo: *Elo-dea canadensis*).

As macrófitas podem ser divididas em três grupos principais, as flutuantes livres, as flutuantes ancoradas e as emergentes.

Pitelli (1988) menciona várias espécies aquáticas, em função do contato delas com o solo, a água ou o ar (Figura 3):

- Hidrófitas flutuantes: estas plantas permanecem na superfície da água, movimentando-se livremente, à deriva do fluxo de água, com suas raízes submersas na água. O contato ocorre apenas entre a água e o ar. Exemplos: alface-d'água (*Pistia stratiotes*), aguapé (*Eichhornia crassipes*) e salvinia (*Salvinia auriculata*) (Figura 3a). O aguapé e a alface-d'água podem inviabilizar o uso de represas para lazer, ou, até mesmo, dificultar a utilização da água em hidrelétricas.
- Hidrófitas suspensas: o contato é apenas com a água, não há raízes. Exemplo: utriculária (*Utricularia foliosa*) (Figura 3b).
- Hidrófitas submersas ancoradas: em contato com a água e o solo (Figura 3c).
- Hidrófitas anfíbias emergentes: ocorrem em águas rasas de, no máximo, 30 a 50 cm de profundidade, com sistema radicular fixo e enterrado no solo, porém, as folhas emergem fora da superfície da água; possuem a parte inferior do caule e, às vezes, as folhas inferiores submersas, e as demais emergentes na flor-d'água (Figura 3d).

A taboa (*Typha angustifolia*) é um exemplo desta classe de plantas aquáticas. As plantas de taboa podem dificultar o escoamento de fluxos d'água em canais e podem tomar conta de grandes áreas alagadas.

- Hidrófitas ancoradas com folhas flutuantes: têm suas raízes ancoradas no leito do manancial, em contato com o solo, a água e o ar; utilizam a tensão superficial e a densidade da água como suporte aéreo de suas folhas. Exemplos: lírio-aquático (*Nymphaea ampla*) e vitória-régia (Figura 3e).
- Hidrófitas de terra molhada: sobrevivem em solos constantemente encharcados. Exemplo: erva-de-bicho (*Polygonum persicaria*) (Figura 3f).

6. Efeitos das Plantas Daninhas Sobre as Culturas

6.1 Interferências diretas

Os prejuízos observados nas plantas cultivadas em função da presença das plantas daninhas não podem ser atribuídos apenas à competição. Existe um conjunto de pressões ambientais que podem ser diretas (competição, alelopatia) ou indiretas (hospedeiras de pragas e doenças). O efeito integrado destes fatores é chamado interferência, ou seja, o conjunto de ações

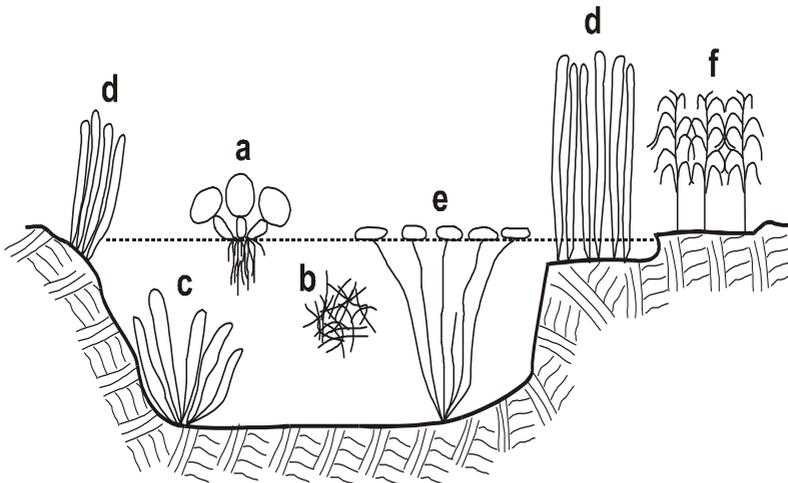


Figura 3. Representação esquemática dos vários tipos de plantas daninhas aquáticas.

que recebe uma determinada cultura em decorrência da presença da comunidade infestante num determinado local (Pitelli, 1985). Com relação às interferências diretas, as mais importantes são competição e alelopatia. No caso da competição, os recursos mais comumente sujeitos ao recrutamento pelas espécies são nutrientes, luz e água. Várias são as definições para o termo competição. Alguns autores definem como sendo os efeitos detrimenais de duas ou mais plantas da mesma espécie ou de espécies diferentes que ocorrem num mesmo período de tempo e espaços definidos (Silva & Silva, 1991).

A competição pode ser intraespecífica, quando ocorre entre indivíduos de uma mesma espécie, e interespecífica quando envolve indivíduos de espécies diferentes (Deuber, 1992).

Dois conceitos do termo competição foram utilizados por (Pitelli, 1985). O primeiro diz respeito à competição que ocorre quando duas ou mais plantas estão convivendo no mesmo ambiente, disputando os recursos do solo e do ar. Algumas características determinam o grau de competitividade como germinação fácil em condições ecológicas variáveis, crescimento e desenvolvimento rápidos de grande superfície fotossintética, grande número de estômatos por unidade de área foliar, porte e arquitetura, extensão e profundidade das raízes, tolerância a adversidades climáticas (geadas, secas, excesso de chuvas) e liberação de substâncias alelopáticas.

O segundo se relaciona com a competição pela sobrevivência, que é a capacidade de uma determinada população em se estabelecer e perpetuar num local determinado. Em comunidades compostas por espécies de ciclo vegetativo longo e em locais não perturbados, o primeiro caso mencionado é fundamental para a sobrevivência da espécie. Porém, em populações de plantas daninhas presentes nos agroecossistemas constantemente perturbados pelo homem, a competição pela sobrevivência assume maior relevância. Neste contexto, as plantas daninhas desenvolveram características que garantem o surgimento de novas gerações (discutidas no início do capítulo).

Outro aspecto da interferência direta é a alelopatia. Este termo foi definido como o efeito prejudicial de uma planta sobre outra através da produção de compostos químicos liberados ao ambiente, denominados aleloquímicos (Rice, 1974). O que difere alelopatia de competição é o fato da competição remover do meio fatores de crescimento necessários a ambas as plantas (água, nutrientes, gás carbônico), enquanto, para alelopatia, ocorre adição de substâncias ao meio. De maneira geral, todas as partes das plantas têm mostrado conter aleloquímicos, como folhas, caules, raízes, rizomas, flores, frutos e sementes. Também no processo de decomposição da palha, há liberação de substâncias alelopáticas.

Certas espécies interferem alelopaticamente sobre a planta cultivada causando sérios prejuízos aos seus crescimento, desenvolvimento e produtividade. Exsudados radiculares de *Sorghum bicolor* reduzem o crescimento da alface, em função da presença de um composto secundário liberado pelo

sorgo denominado quinona sorgoleona (Barbosa et al., 1998). Compostos aleloquímicos, como ácidos fenólicos, são liberados no solo, na decomposição da aveia, podendo prejudicar plantas que estão se estabelecendo (Jacobi & Fleck, 1998). O capítulo 5 aborda tais aspectos com maior abrangência e maiores detalhes.

As plantas daninhas podem ainda interferir diretamente, reduzindo a qualidade do produto colhido, no caso da depreciação da qualidade de fibras vegetais e animais, em função da presença de propágulos de plantas daninhas como acontece quando sementes de carrapicho-de-carneiro (*Acanthospermum hispidum*) e capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*) prendem-se às fibras de algodão. Pode ocorrer, também, a condenação de lotes de sementes de culturas agrícolas, em função da presença de sementes de plantas daninhas consideradas nocivas proibidas.

Também a atividade pecuária pode ser afetada em função da presença de plantas tóxicas nas pastagens, capazes de matar o gado, como o cafezinho (*Palicourea margravii*) e o oficial-de-sala (*Asclepias curassavica*). Animais tratados com feno contendo sementes de capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*) podem rejeitar o alimento.

Outra forma importante de interferência direta é o parasitismo. Como exemplo, é possível mencionar o cipó-chumbo (*Cuscuta racemosa*), espécie parasita que causa sérios prejuízos à cultura da alfafa (Dawson, 1990).

Nos Estados Unidos e na África, a erva-de-bruxa (*Striga* spp.) é considerada como parasita de gramíneas cultivadas como o milho, o sorgo e o milheto (Weeb & Smith, 1996). É parasita obrigatório de raízes, requerendo os exsudados radiculares do hospedeiro para estimular a germinação de suas sementes. Durante os primeiros estádios de crescimento, é totalmente dependente do hospedeiro. Posteriormente, passa a realizar fotossíntese e retirar do solo parte dos nutrientes e água de que necessita (semi-parasitismo). Produz grande quantidade de sementes que podem sobreviver por mais de 14 anos no solo (Bebawi et al., 1984).

Tratos culturais e colheita são prejudicados em áreas infestadas por determinadas espécies de plantas daninhas. Provocam embuchamento nas colhedoras, podendo provocar quebra do implemento. Áreas contendo elevada infestação de balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*) e corda-de-violão (*Ipomoea* spp.) podem dificultar a colheita (Figura 4).

6.2 Interferências indiretas

Com relação à interferência indireta, as plantas daninhas assumem importância quando atuam como hospedeiras alternativas de pragas, moléstias, nematóides e plantas parasitas. O mosaico-dourado é uma doença virótica que ocorre em espécies de guaxumas. As plantas desta espécie são tolerantes ao vírus que é transmitido pela mosca-branca a lavouras de feijão, soja e algodão. O amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) e a guaxuma (*Sida rhombifolia*) são também hospedeiros do vírus do mosaico-anão e do



Figura 4. Cultura de cana-de-açúcar (esquerda) e de girassol (direita) infestadas com balãozinho (*Cardiospermum halicacabum*) e corda-de-viola (*Ipomoea* spp.), respectivamente.

mosaico-crespo, respectivamente. No caso de nematóides, foram identificadas 57 espécies de plantas daninhas no Brasil que atuam como hospedeiras alternativas de *Meloidogyne javanica*. Formas juvenis do nematóide do cisto da soja (*Heterodera glycines*) conseguem penetrar em raízes de mentrasto (*Ageratum conyzoides*), desmódio (*Desmodium tortuosum*) e feijão-bravo (*Cassia* spp.) (Dias et al., 1995).

Determinadas espécies de plantas daninhas liberam grãos de pólen capazes de irritar a pele e as narinas de trabalhadores rurais.

A existência de plantas daninhas em lagos, represas e canais de irrigação resulta em elevada perda de água via transpiração. Essa perda de água pelas plantas aquáticas chega a ser muito maior do que aquela que ocorre por evaporação. Além disto, a velocidade da água nos canais é reduzida, aumentando a sedimentação de partículas e encarecendo a manutenção.

6.3 Fatores que afetam o grau de interferência

Denomina-se grau de interferência a redução percentual do crescimento ou produtividade de uma cultura provocada pela interferência das plantas daninhas.

6.3.1 Fatores ligados à cultura

A capacidade de competir com plantas daninhas varia entre espécies de plantas e, até mesmo, entre cultivares de uma mesma espécie (Burnside, 1979). Algumas suprimem as plantas daninhas, reduzindo sua biomassa e a produção de propágulos. Outras conseguem suportar altos níveis de infestação e, mesmo assim, alcançar bons rendimentos. Cultivares de rápido

crescimento, recrutamento de recursos do meio e alto poder de interceptação da luz solar dificultam o acesso e a utilização destes recursos pela comunidade infestante. Pesquisas, em nível mundial, demonstraram que determinadas cultivares de soja têm maior habilidade competitiva quando na presença de plantas daninhas (Monks & Oliver, 1988).

Brighenti et al. (2002) avaliaram a capacidade competitiva de três cultivares de soja (BRS 183, BRS 156 e BRS 133) na presença de quatro densidades de leiteiro (*Euphorbia heterophylla*). A cultivar BRS 183 apresentou maior área foliar e fitomassa seca que a demais cultivares (Figura 5). As características desta cultivar refletiram em maior supressão do amendoim-bravo que alcançou menor fitomassa seca na presença da BRS 183 (Figura 6).

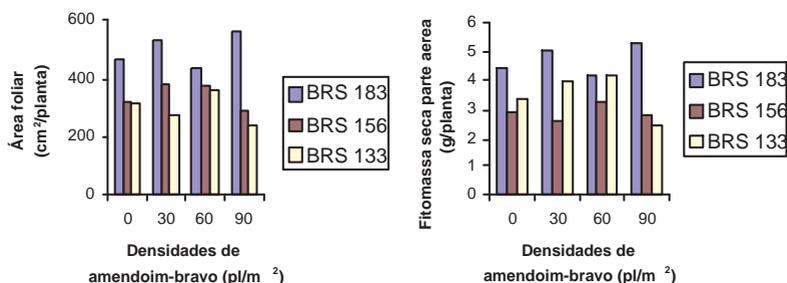


Figura 5. Área foliar de plantas de soja (esquerda) e fitomassa seca da parte aérea (direita), em função da densidade de plantas de amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*).

O espaçamento das entrelinhas da cultura é outro fator importante na determinação da capacidade competitiva da cultura, pois determina a intensidade e a precocidade de sombreamento do solo. Os espaçamentos utilizados para cultura da soja, 45 e 50 cm, permitem a entrada de grande quantidade de luz entre as fileiras da cultura e, nos dois meses que sucedem a semeadura, ocorre a emergência de plantas daninhas, durante o período crítico de prevenção da interferência (Pitelli & Durigan, 1984). A diminuição dos espaçamentos entre linhas favorece o sombreamento mais rápido do solo, prejudicando a emergência das plantas daninhas e favorecendo a cultura na competição pelos fatores limitantes do meio (Shaw et al., 1991; Braz & Durigan, 1993). Quando a soja foi semeada em três espaçamentos diferentes nas entrelinhas (23, 46 e 91 cm), houve maior interceptação da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura no menor espaçamento (Figura 7). Neste caso, menor quantidade de luz consegue atingir o solo, resultando em menor número de sementes de plantas daninhas germinadas (Yelverton & Coble, 1991).

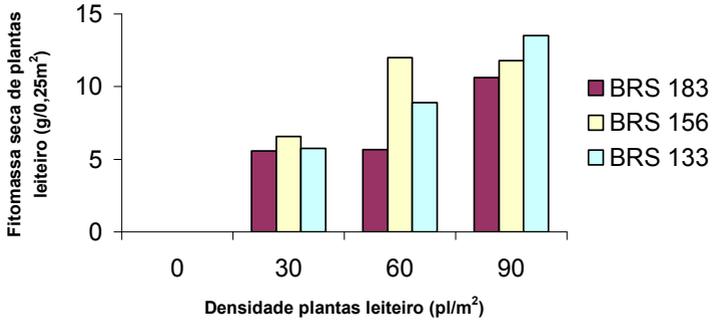


Figura 6. Fitomassa seca de plantas de amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) em diferentes densidades (plantas m⁻²) na presença de três cultivares de soja.

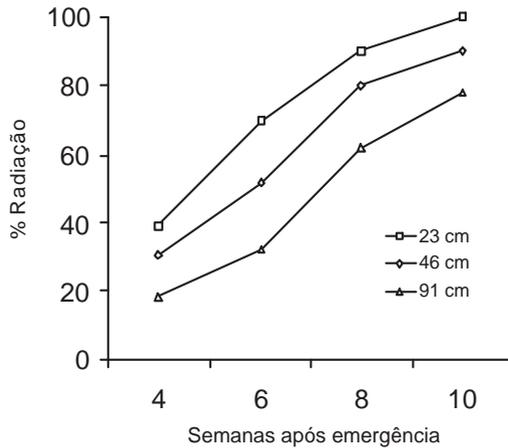


Figura 7. Porcentagem de radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela cultura da soja semeada em três espaçamentos entre linhas. Fonte: [Yelverton & Coble \(1991\)](#).

Outro aspecto relacionado ao espaçamento pode ser observado nos trabalhos de [Brighenti et al. \(2003\)](#) que aplicaram 100% e 50% da dose recomendada da mistura formulada de fluazifop-p-butil+fomesafen para o controle de plantas daninhas na cultura da soja. A cultivar utilizada foi a BRS 156, semeada nos espaçamentos de 20, 40 e 60 cm, mantendo 400 mil plantas por hectare. Verificou-se que, em espaçamentos reduzidos, a produtividade da soja, em função da aplicação da metade da dose recomendada foi similar a produtividade alcançada na dose recomendada (Figura 8). Além disto, quando se analisa unicamente a testemunha sem capina, é possível perceber o reflexo positivo do controle cultural sobre a produtividade da soja, somente pela redução dos espaçamentos entrelinhas de 60 cm para 20 cm.

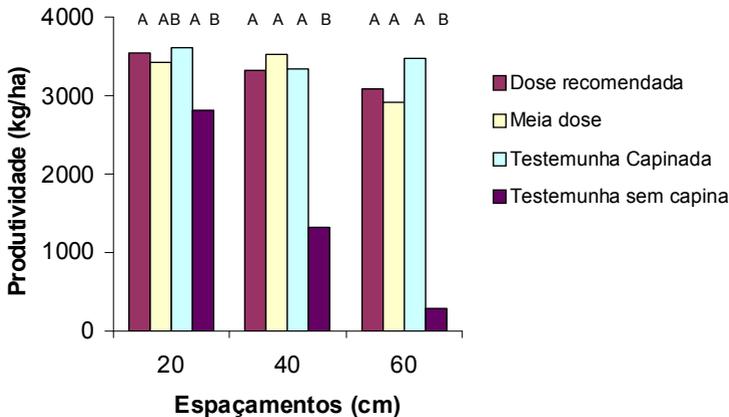


Figura 8. Produtividade da cultura da soja implantada em três espaçamentos entre linhas e submetida a diferentes manejos de espécies daninhas.

Os estudos de densidade também são importantes para incrementar o potencial competitivo de plantas de interesse agrônomo e não permitir a competição intraespecífica na cultura ([Marwat & Nafziger, 1990](#)). Um exemplo é o arroz irrigado cultivado em três densidades de semeadura convivendo com o arroz vermelho. O número de perfilhos por planta, a biomassa seca da espécie daninha, o número de panículas por área e o rendimento de grãos do arroz vermelho foi menor na maior densidade de semeadura do arroz irrigado (Tabela 6) ([Menezes & Silva, 1996](#)).

Assim, a combinação de espaçamentos reduzidos e densidades adequadas de plantas na linha é condição imprescindível para que a cultura som-

Tabela 6. Número de perfilhos, biomassa seca por planta, número de panículas por m² e rendimento de grãos do arroz vermelho, em função de três densidades de semeadura de arroz irrigado. Fonte: Menezes & Silva (1996).

Densidade de semeadura (kg ha ⁻¹)	Arroz vermelho			
	Perfilhos planta ⁻¹	Biomassa seca (g planta ⁻¹)	Panículas m ⁻²	Rendimento de grãos (kg ha ⁻¹)
75	2,3	5,2	111	885
150	1,9	4,8	82	717
225	1,6	4,4	74	589

breie mais rápido o solo e seja mais agressiva no controle das plantas daninhas.

6.3.2 Fatores ligados à comunidade infestante

Quanto mais próximas são as espécies no que se refere a caracteres morfológicos e fisiológicos, mais similares são as exigências em relação aos fatores de crescimento, sendo mais intensa a competição entre elas. Também, quanto maior a densidade da comunidade infestante, maior será a quantidade de indivíduos que disputam os mesmos recursos e mais intensa será a competição sofrida pela cultura. Outro fator relevante é a distribuição das plantas daninhas na área cultivada. A proximidade de determinadas plantas infestantes em relação às linhas de semeadura aumenta a interferência da população daninha sobre a cultura.

6.3.3 Fatores ligados ao ambiente

As respostas de diferentes espécies de plantas daninhas às condições edafoclimáticas de diferentes regiões causam mudanças no equilíbrio da comunidade e da cultura, influenciando o balanço competitivo. Por exemplo, a adubação do solo não só favorece a cultura como também a planta daninha. Algumas têm maior eficiência no aproveitamento dos fertilizantes e, crescendo mais, aumentam a pressão competitiva sobre a cultura. A prática de distribuição do adubo próximo ao sulco facilita a sua utilização pela cultura. Os tratamentos fitossanitários, irrigações e correções de solo visam favorecer as plantas cultivadas em detrimento das plantas daninhas.

Os efeitos negativos da presença das plantas daninhas serão sempre mais acentuados em condições de falta de um ou mais insumos necessários à produção. Neste caso, as espécies mais eficientes e adaptadas é que dominarão a competição. De modo geral, as plantas daninhas mostram-se mais eficientes nestas condições.

Desta maneira, quanto maior o período de tempo em que as plantas daninhas e a cultura convivem num mesmo lugar, maior será o grau de interferência, tornando-se importante os estudos sobre os chamados períodos de controle.

6.3.3.1 Período de controle ou de convivência

A época e a duração do período em que a cultura e a comunidade infestante convivem influenciam, consideravelmente, a intensidade de interferência. O primeiro tipo é aquele, a partir da sementeira, emergência ou transplante em que a cultura deve crescer livre da presença de plantas daninhas, a fim de que sua produtividade não seja alterada significativamente. As espécies daninhas que se instalarem após este período não interferirão de maneira a reduzir a produtividade da planta cultivada. Após o término deste período a cultura apresenta capacidade de controlar as plantas daninhas em função da cobertura do solo, abafando estas espécies. Este período é denominado de período total de prevenção da interferência (PTPI) e sua extensão depende de inúmeros fatores que afetam o balanço cultura - planta daninha. Este período corresponde à duração mínima desejável do efeito residual de herbicidas aplicados em condições de pré-emergência ou pré-plantio-incorporado.

Vários são os estudos destes períodos no Brasil em diversas culturas. Contudo, nem sempre os autores chegam aos mesmos resultados. Isso é aceitável, pois as condições em que são desenvolvidos os experimentos são diferentes, bem como as cultivares e a composição das espécies infestantes que variam de uma região para outra. Culturas bem implantadas, com densidade de sementeira adequada, adubação e espaçamentos corretos e variedades bem adaptadas às condições edafoclimáticas tendem a apresentar reduções nos valores de PTPI. Estudos recentes revelam valores mais baixos deste período em função do desenvolvimento de novas cultivares, de novas tecnologias e à evolução das práticas culturais adotadas, fazendo com que as culturas se tornem cada vez mais vigorosas em termos de crescimento, sendo cada vez menos exigentes em termos de duração do período em que há necessidade de adoção de práticas de controle de plantas daninhas.

Entretanto, no início do ciclo de desenvolvimento a cultura e a comunidade infestante podem conviver por um determinado período sem que ocorram efeitos danosos sobre a produtividade da cultura. Durante esta fase, o meio é capaz de fornecer as quantidades de fatores de crescimento necessárias para o crescimento da cultura e das espécies daninhas. Essa fase é denominada de período anterior a interferência (PAI) ou fase de pré-interferência (FPI) (Velini, 1992). Durante este período não há necessidade de adoção de práticas de controle de plantas daninhas. Em termos teóricos, o final desta fase corresponderia à melhor época para o início da adoção de práticas de controle de espécies infestantes. Entretanto, em termos práticos, a seleção da melhor época de controle das plantas daninhas

é definida primordialmente pelo nível de eficácia da mesma e pelo nível de seletividade à cultura.

Quando os dois períodos são considerados em conjunto, podem existir três possibilidades:

1. O PTPI é maior que o PAI, neste caso ocorre um terceiro período que denominamos de período crítico de prevenção de interferências (PCPI). Este período corresponde à fase em que as práticas de controle deveriam ser efetivamente adotadas. Neste caso, as possibilidades de controle são aplicações de herbicidas em condições de pré-emergência ou em pré-plantio-incorporado com efeito residual igual ou maior que o PTPI; a aplicação de um herbicida que apresente ação pré-emergente ou um pós-emergente antes do final do PAI, onde o efeito deve manter-se também até o final do PTPI. Outra opção é a adoção de práticas manuais ou mecânicas de controle que deverão iniciar-se antes do término do PAI e repetir-se até o término do PTPI. Neste caso, é inviável a utilização de herbicidas exclusivamente pós-emergentes ou uma única utilização de qualquer outro tipo de prática instantânea de controle desprovida de efeito residual.
2. O PTPI é menor que o PAI. Neste caso, ocorre um período delimitado pelos limites superiores do PTPI e do PAI, no qual basta remover as plantas daninhas por uma única vez para que a cultura manifeste plenamente o seu potencial produtivo. Neste caso, além de serem válidas todas as possibilidades de controle mencionadas para o caso anterior, passa a ser viável a utilização de herbicidas exclusivamente pós-emergentes, desde que a aplicação seja feita durante o período compreendido entre o final do PTPI e o final do PAI.
3. O PTPI e o PAI apresentam a mesma duração. Trata-se de uma situação bastante incomum, mas possível. Neste caso, são válidas também todas as possibilidades de controle. Mas, para que se tenha pleno sucesso, a aplicação de herbicidas exclusivamente em condições de pós-emergência ou a adoção de outras práticas instantâneas de controle deve ser realizada exatamente quando do término do PAI e do PTPI.

Brighenti et al. (2004) realizaram estudos desta natureza para a cultura do girassol. Verificaram que a convivência do girassol com as plantas daninhas até 21 dias após a emergência (DAE) do girassol não causou efeito sobre a produtividade da cultura, correspondendo ao período anterior a interferência (PAI) (Figura 9). O período total de prevenção à interferência (PTPI) foi de aproximadamente 30 DAE (Figura 10) e o período crítico de prevenção à interferência (PCPI) entre 21 e 30 DAE da cultura do girassol.

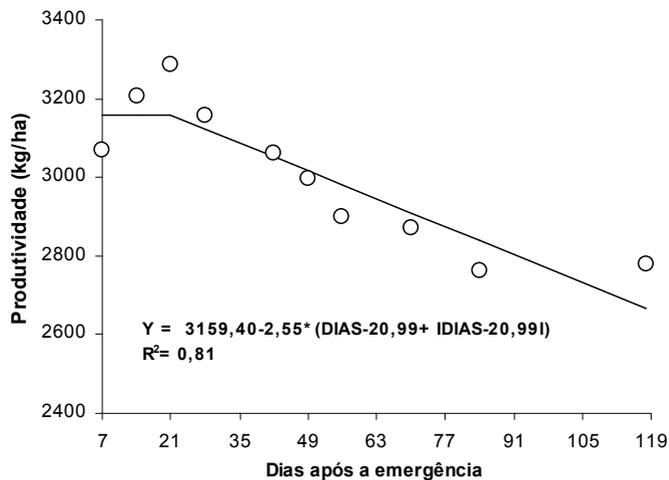


Figura 9. Produtividade da cultura do girassol, em função de períodos de interferência na presença de plantas daninhas.

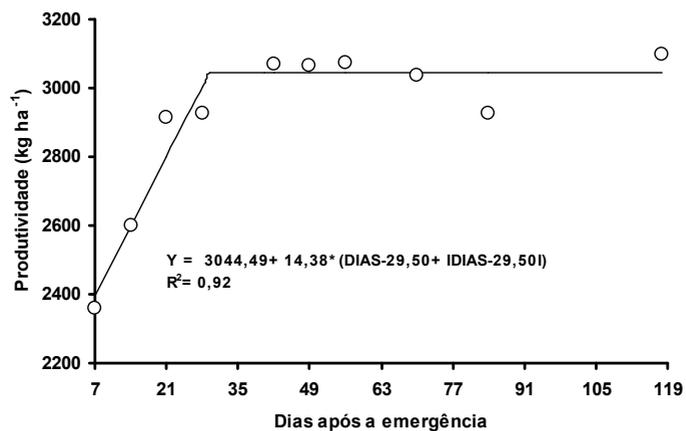


Figura 10. Produtividade da cultura do girassol, em função de períodos de interferência na ausência de plantas daninhas.

Referências

- Baker, H.C., The evolution of weeds. *Annual Rev Ecol Syst*, 5:1–24, 1974.
- Barbosa, T.M.L.; Ferreira, F.A.; Souza, I.F.; Barbosa, L.C.A. & Casali, V.W.D., Caracterização química e efeitos alelopáticos de exsudados radiculares de plântulas de sorgo sobre alface. *Planta Daninha*, 16:153–162, 1998.
- Barret, S.H., Crop mimicry in weeds. *Econ Bot*, 37:255–282, 1983.
- Bebawi, F.E.; Eplee, R.E.; Harris, C.E. & Norris, R.S., Longevity of witchweed (*Striga asiatica*) seed. *Weed Sci*, 32:494–497, 1984.
- Brandão, M.; Laca-Buendia, J.P.; Gavilanes, M.L.; Zurlo, M.A.; Cunha, L.H.S. & Cardoso, C., Novos enfoques para plantas consideradas daninhas. *Inf Agropec*, 11:3–12, 1985a.
- Brandão, M.; Laca-Buendia, J.P.; Mascarenhas, M.H.T.; Cunha, L.H.S. & Gavilanes, M.L., Plantas daninhas de controle problemático. *Inf Agropec*, 11:52–63, 1985b.
- Braz, B.A. & Durigan, J.C., Efeitos da redução do espaçamento e dosagens de herbicidas no controle de plantas daninhas, em duas épocas de semeadura de soja (*Glycine max*). In: *Resumos do 19º Congresso Brasileiro de Herbicidas e Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBHED, p. 97–99, 1993.
- Brighenti, A.; Gazziero, D. & Voll, E., Controle cultural associado a doses reduzidas de herbicidas na cultura da soja. In: *Anais da 25ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil*. Londrina, PR: EMBRAPA Soja, p. 234, 2003.
- Brighenti, A.M.; Bortoluzi, E.S.; Adegas, F.S.; Gazziero, D.L.P. & Voll, E., Habilidade competitiva de cultivares de soja na presença de *Euphorbia heterophylla*. In: *Anais da 24ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil*. Londrina, PR: EMBRAPA Soja, p. 183–184, 2002.
- Brighenti, A.M.; Castro, C.; Oliveira Jr., R.S.; Scapim, C.A.; Voll, E. & Gazziero, D.L.P., Períodos de interferência de plantas daninhas na cultura do girassol. *Planta Daninha*, 22:251–257, 2004.
- Brighenti, A.M.; Silva, J.F.; Lopes, N.F.; Cardoso, A.A. & Ferreira, L.R., Crescimento e partição de assimilados em losna. *Rev Bras Fisiol Veg*, 5:41–45, 1993.
- Brighenti, A.M.; Silva, J.F.; Sedyama, T.; Silveira, J.S.M. & Sedyama, C.S., Análise de crescimento da tiririca (*Cyperus rotundus* L.). *Revista Ceres*, 44:94–110, 1997.
- Brighenti, A.M.; Voll, E. & Gazziero, D.L.P., *Chloris polydactyla* (L.) Sw., a perennial Poaceae weed: emergence, seed production, and its management. *Weed Biol Manag*, 7:84–88, 2007.

- Burnside, O.C., Soybean (*Glycine max*) growth as affected by weed removal, cultivar and row spacing. *Weed Sci*, 27:562–565, 1979.
- Burnside, O.C.; Wilson, R.G.; Weisberg, S. & Hubbard, K., Seed longevity of 41 species buried 17 years in Eastern and Western Nebraska. *Weed Sci*, 44:74–86, 1996.
- Campo, C.B.H.; Gazziero, D.L.P. & Barreto, J.N., Estudos de competição de amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) e a soja. In: *Resultados de Pesquisa - 1982/83*. Londrina, PR: EMBRAPA-CNPSoja, p. 160–161, 1983.
- Carvalho, M.N. & Nakagawa, J., *Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção*. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1988. 429 p.
- Christoffoleti, P.J.; López Ovejero, R.F.; Nicolai, M.; Vargas, L.; Carvalho, S.J.P.; Cataneo, A.C.; Carvalho, J.C. & Moreira, M.S., *Aspectos de Resistência de Plantas Daninhas a Herbicidas*. Piracicaba, SP: Associação Brasileira de Ação a Resistência de Plantas aos Herbicidas (HRAC-BR), 2008. 120 p.
- Dawson, J.H., Dodder (*Cuscuta spp*) control with dinitroaniline herbicides in alfalfa (*Medicago sativa*). *Weed Technol*, 4:341–348, 1990.
- Deuber, R., *Ciência das Plantas Daninhas: Fundamentos*. v. 1. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1992. 431 p.
- Dias, W.P.; Ferraz, S.; Silva, A.A.; Lima, R.D. & Valle, L.A.C., Hospedabilidade de algumas ervas daninhas ao nematóide de cisto da soja. *Nematologia Bras*, 19:9–14, 1995.
- Gazziero, D.L.P.; Brighenti, A.M.; Voll, E. & Maciel, C.D.G., Convivência da planta daninha amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) com a cultura da soja no Estado do Paraná. In: *Anais da 20ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil*. Londrina, PR: CNPSoja, p. 378, 1998.
- Gelmini, G.A., *Controle químico do aguapé (Eichhornia crassipes (Mart.) Solms) e da alface-d'água (Pistia stratiotes L.)*. Dissertação – mestrado em fitotecnia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1996.
- Gutternan, Y.; Corbineau, F. & Come, D., Interrelated effects of temperature, light and oxygen on *Amaranthus caudatus*L. seed germination. *Weed Res*, 32:111–117, 1992.
- Jacobi, U.S. & Fleck, N.G., Avaliação do potencial alelopático de genótipos de aveia no final de ciclo. *Planta Daninha*, 16:187–207, 1998.
- Kissmann, K.G., *Trapoeiras*. São Paulo, SP: BASF Brasileira S.A., 1989. 4 p.
- Kissmann, K.G., *Plantas Infestantes e Nocivas*. 1ª edição, v. I. São Paulo, SP: BASF Brasileira S.A., 1991. 608 p.

- Kissmann, K.G., *Plantas Infestantes e Nocivas*. 1a edição, v. II. São Paulo, SP: BASF Brasileira S.A., 1992. 798 p.
- Kissmann, K.G., *Plantas Infestantes e Nocivas*. 1a edição, v. III. São Paulo, SP: BASF Brasileira S.A., 1995. 683 p.
- Kissmann, K.G., *Plantas Infestantes e Nocivas*. 2a edição, v. I. São Paulo, SP: BASF Brasileira S.A., 1997. 825 p.
- Lacey, J.R.; Wallander, R. & Olson-Rutz, K., Recovery, germinability and viability of leafy spurge (*Euphorbia esula*) seeds ingested by sheep and goats. *Weed Technol*, 6:599-606, 1992.
- Lorenzi, H., *Plantas Daninhas do Brasil: Terrestres, Aquáticas, Parasitas, Tóxicas e Medicinais*. 2a edição. Nova Odessa, SP: Plantarum, 1991. 440 p.
- Marinis, G., Ecologia de plantas daninhas. In: Camargo, P. (Ed.), *Texto Básico de Controle de Plantas Daninhas*. Piracicaba, SP: ESALQ, 4a edição, p. 1-74, 1972.
- Marwat, K.B. & Nafziger, E.D., Cocklebur and velvetleaf interference with soybean grown at different densities and planting patterns. *Agron J*, 82:531-534, 1990.
- Menezes, V.G. & Silva, P.R.F., Manejo de arroz vermelho através do tipo e arranjo de plantas de arroz irrigado. *Planta Daninha*, 16:45-57, 1996.
- Monks, D.W. & Oliver, L.R., Interactions between soybean (*Glycine max*) cultivars and selected weeds. *Weed Sci*, 36:770-774, 1988.
- Muzik, T.J., *Weed Biology and Control*. New York, EUA: McGraw-Hill, 1970. 273 p.
- Pitelli, R.A., Interferência de plantas daninhas em culturas agrícolas. *Inf Agropec*, 11:16-27, 1985.
- Pitelli, R.A., *Biologia das Plantas Daninhas*. Jaboticabal, SP: FCAV/UNESP, 1988. 43 p.
- Pitelli, R.A. & Durigan, J.C., Terminologia para períodos de controle e de convivência para plantas daninhas em culturas anuais e bianuais. In: *Resumos do 15º Congresso Brasileiro de Herbicidas e Plantas Daninhas*. Piracicaba, SP: SBHED, p. 37, 1984.
- Radosevich, S.; Holt, J. & Ghera, C., *Weed Ecology: Implications for Management*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1997. 589 p.
- Rice, E.L., *Allelopathy*. New York, EUA: Academic Press, 1974. 353 p.
- Rolston, M.P., Water impermeable seed dormancy. *Bot Review*, 44:365-396, 1978.
- Ruedell, J., *Plantio Direto na Região de Cruz Alta*. Cruz Alta, RS: Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotriga - FUNDACEP, 1995. 133 p.

- Schultz, A.R., *Estudo Prático de Botânica Geral*. 3a edição. Porto Alegre, RS: Globo, 1968. P. 83-94.
- Shaw, D.R.; Bruff, S.A. & Smith, C.A., Effect of soybean (*Glycine max*) row spacing on chemical control of sicklepod (*Cassia obtusifolia*). *Weed Technol*, 5:286-290, 1991.
- Silva, J.F. & Silva, J.F., *Curso de Proteção de Plantas. Módulo 5 (1-4)*. Brasília, DF: ABEAS, 1991.
- Velini, E.D., Interferências entre plantas daninhas e cultivadas. In: *Avances en Manejo de Malezas en la Producción Agrícola y Florestal*. Santiago de Chile: Asociación Latino Americana de Malezas, p. 42-58, 1992.
- Voll, E.; Gazziero, D.L.P.; Adegas, F.S. & Brighenti, A.M., Dinâmica do estabelecimento e competição de balãozinho. In: *Anais da 20ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil*. Londrina, PR: CNPSoja, p. 383, 1998a.
- Voll, E.; Gazziero, D.L.P.; Brighenti, A.M. & Lélis Filho, O., Dinâmica de estabelecimento e competição de desmódio. In: *Anais da 20ª Reunião de Pesquisa de Soja da Região Central do Brasil*. Londrina, PR: CNPSoja, p. 384, 1998b.
- Weeb, M. & Smith, M.C., Biology of *Striga hermonthica* (scrophulariaceae) in Sahelian Mali: effects on pearl millet yield and prospects of control. *Weed Res*, 36:203-211, 1996.
- Wilson, R.D., Dissemination of weed seed by surface irrigation in Western Nebraska. *Weed Sci*, 28:87-92, 1980.
- Yelverton, F.H. & Coble, H., Narrow row spacing and canopy formation reduces weed resurgence in soybean (*Glycine max*). *Weed Technol*, 5:169-174, 1991.
- Zimdahl, R.L., *Fundamentals of Weed Science*. 2a edição. Fort Collins, EUA: Academic Press, 1999. 556 p.

Banco de Sementes e Mecanismos de Dormência em Sementes de Plantas Daninhas

Alessandro de Lucca e Braccini

1. Introdução

O controle de plantas daninhas assume um papel extremamente importante no manejo de inúmeras culturas, apresentando reflexos diretos no rendimento das lavouras e nos custos de produção. As táticas de controle devem estar inseridas em um sistema de manejo integrado, ou seja, um conjunto de práticas de manejo do solo e cultural, que interfiram negativamente no estabelecimento e na competição das plantas daninhas com a cultura, além de propiciar o seu controle por meios preventivos, mecânicos, químicos ou biológicos, associados às condições ambientais predominantes na área de cultivo.

Para o manejo adequado de um sistema agrícola, torna-se necessário a sua avaliação. O método empírico tem como base observações visuais pouco precisas, enquanto que a metodologia de levantamento, por amostragens, como por exemplo, do banco de sementes da flora daninha, apresenta maior precisão. Devido à necessidade de redução nos custos de produção e às crescentes preocupações com as questões ambientais, atualmente, novos métodos de manejo vêm sendo pesquisados. Neste sentido, a agricultura de precisão vem conquistando adeptos. A avaliação do grau de infestação de determinadas pragas-chave, o nível de fertilidade do solo, as perdas associadas à colheita mecanizada e outros aspectos determinantes da produtividade de uma cultura são realizados por meio de levantamentos e, em função deles, são estabelecidas as ações necessárias ao seu manejo. Recentemente, a aplicação de herbicidas, uma das poucas tecnologias que ainda utiliza avaliações empíricas nas suas recomendações técnicas, tem evoluído seja pela aplicação de taxas diferenciadas de doses segundo a capacidade de retenção do solo ou devido a utilização de modernos sensores que permitem aplicação do produto apenas na presença de plantas vivas na área.

Segundo [Voll et al. \(1997\)](#), os levantamentos de bancos de sementes de espécies de plantas daninhas no solo, para serem utilizados em sistemas de manejo integrado de plantas daninhas, requerem procedimentos adequados de amostragem de solo e um processo de extração e identificação das

espécies. Para realizar a predição, torna-se necessário relacionar, ainda, o comportamento das espécies de plantas daninhas do solo com as práticas culturais executadas e os principais processos fisiológicos e ecológicos envolvidos. As taxas de germinação de um banco de sementes e o processo de deterioração das sementes não germinadas remanescentes, bem como as taxas de transformação em plantas adultas e a respectiva produção de sementes, que podem apresentar-se viáveis e dormentes, devem estar relacionadas com as causas que produzem estas alterações. A longevidade das sementes de plantas daninhas no solo é variável em função das características da espécie, condição fisiológica das sementes, dormência, profundidade de enterrio e manejo do solo.

As plantas daninhas continuam a apresentar grandes impactos sobre a produção das culturas a despeito dos esforços despendidos na sua eliminação e controle. Muitas espécies de invasoras dependem da dispersão das sementes para sua regeneração e perpetuação. Contudo, a composição e a densidade das sementes de espécies de invasoras no solo apresentam uma grande variação e estão intimamente relacionadas ao histórico das propriedades agrícolas e das práticas de manejo adotadas. A rotação de culturas e as práticas de controle de plantas daninhas também apresentam impacto sobre a dinâmica populacional dos bancos de sementes do solo (Buhler et al., 1998).

As informações sobre os bancos de sementes de invasoras no solo poderão ser uma ferramenta bastante importante no manejo integrado de plantas daninhas. Modelos para tomada de decisão estão sendo desenvolvidos, os quais utilizam as informações sobre a composição dos bancos de sementes para estimar as populações de plantas daninhas, as perdas de produtividade nas culturas provocadas pela sua competição e para recomendação de táticas de controle. Portanto, o conhecimento da dinâmica dos bancos de sementes no solo e dos mecanismos de dormência das sementes poderá ser utilizado para o desenvolvimento e melhoria dos sistemas de manejo.

2. Banco de Sementes no Solo

2.1 Conceito de banco de sementes

Todas as sementes viáveis presentes na superfície ou enterradas no solo constituem o banco de sementes do solo. Harper (1977) visualizou o solo como um banco de sementes ou reservatório no qual são realizados diversos processos que resultam em depósitos e retiradas (Figura 1). A produção das sementes e sua dispersão no solo são processos que resultam em depósitos, enquanto que as germinações, deterioração ou morte e predações por insetos, microrganismos e outros, são processos que resultam em retiradas. O armazenamento resulta na distribuição vertical das sementes no perfil do solo, onde a maioria das sementes de plantas daninhas concentra-se su-

perificalmente ou em pequena profundidade. Os bancos de sementes têm se tornado uma parte indispensável e bastante reconhecida da ecologia das populações de plantas daninhas, sobre os quais estão disponíveis substanciais informações a respeito dos processos envolvidos na sua dinâmica (Leck et al., 1989). Além disto, a obtenção de informações sobre a dinâmica dos bancos de sementes tem permitido a melhoria das estratégias de manejo das plantas daninhas.

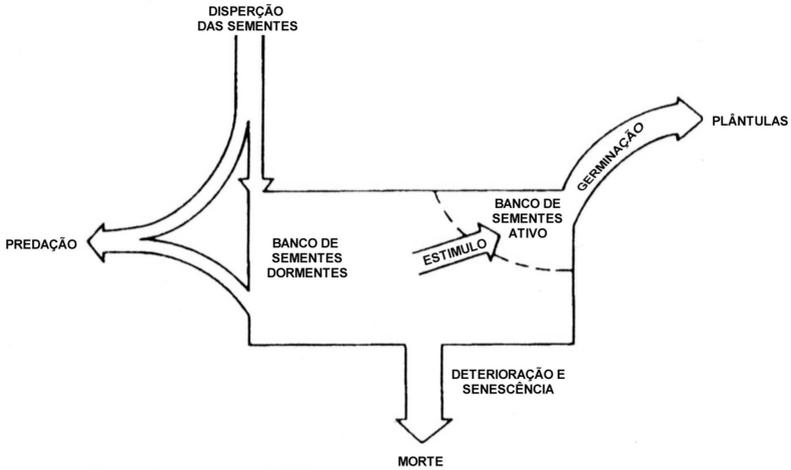


Figura 1. Modelo da dinâmica do banco de sementes de plantas daninhas no solo. Adaptado de Harper (1977).

A maioria das comunidades de plantas anuais é regenerada por meio das sementes armazenadas no banco de sementes do solo. Entretanto, o estabelecimento das plântulas requer que as sementes apresentem condições fisiológicas específicas para sua germinação. Este estado fisiológico das sementes normalmente ocorre durante um período limitado de viabilidade, o qual geralmente coincide com as condições ambientais favoráveis. Para a maioria das espécies de plantas daninhas anuais, o solo é o meio onde as condições fisiológicas específicas ocorrem (Thompson & Grime, 1979). Contudo, algumas sementes podem persistir viáveis no solo por vários anos e podem somar-se às sementes que são adicionadas anualmente ao banco de sementes do solo, favorecendo o estabelecimento futuro de novas comunidades de plantas (Cavers, 1995).

As práticas de manejo cultural apresentam os maiores impactos sobre os processos que envolvem o banco de sementes no solo para as espécies

de plantas daninhas anuais, além de regular o desenvolvimento das comunidades de plantas. As estratégias de regeneração das espécies invasoras apresentam grande variação. As sementes de determinadas espécies apresentam um período de viabilidade bastante curto e sua regeneração é extremamente dependente da produção anual de sementes e de sua dispersão. Para outras espécies, as sementes podem permanecer no solo por longos períodos com as germinações ocorrendo ao longo do tempo, em virtude dos mecanismos de dormência (Bazzaz, 1990; Murdoch & Ellis, 1992). Contudo, as sementes que apresentam grande longevidade no solo geralmente representam uma pequena proporção do banco de sementes (Wilson, 1988). Para o manejo cultural, o que realmente interessa são aquelas sementes que apresentam germinação nos primeiros anos após a sua dispersão. A compreensão da dinâmica de curto prazo destas sementes e das populações de plantas daninhas resultantes pode fornecer uma estimativa do potencial das perdas de produtividade das culturas e dos custos de controle.

O banco de sementes no solo é considerado a principal fonte de novas infestações de plantas daninhas anuais, as quais representam a maioria dos problemas nos sistemas de produção agrícola (Cavers, 1983). Além disto, as características do banco de sementes de plantas daninhas influenciam tanto na população de plantas que ocorrem no campo quanto no sucesso das práticas de manejo adotadas para controlá-las. Muitos fatores estão envolvidos na regulação dos bancos de sementes no solo, tais como o seu tamanho, a composição e distribuição das espécies, os quais estão na dependência de novas introduções de sementes e de suas perdas (Schweizer & Zimdahl, 1984; Burnside et al., 1986).

2.2 Classificação dos bancos de sementes

O banco de sementes do solo pode ser constituído por milhares de sementes de plantas daninhas por metro quadrado, podendo ser considerado a principal fonte de sementes de invasoras para infestações futuras. Thompson & Grime (1979) classificaram os bancos de sementes em dois tipos fundamentais: transitório e persistente. O banco de sementes transitório é constituído de sementes que podem permanecer viáveis por no máximo um ano. O banco de sementes persistente contém sementes que não germinam durante o primeiro ano após terem sido produzidas, pelo fato de que muitas delas podem apresentar dormência, tanto primária como secundária.

As sementes que compõem o banco persistente, geralmente encontram-se enterradas em maiores profundidades e são consideradas a principal fonte de infestações futuras de plantas daninhas em área agrícolas. Sementes de algumas espécies de invasoras podem permanecer dormentes e viáveis no solo por vários anos, sendo que para muitas espécies este período pode ser superior a vinte anos (Darlington & Steinbauer, 1961; Lewis, 1973). Portanto, esta longevidade em algumas espécies pode dificultar sobremaneira o seu manejo nos campos de produção.

2.3 Densidade e composição do banco de sementes do solo

A composição e a densidade das sementes de plantas daninhas no solo apresentam grande variação e estão intimamente relacionadas com o histórico de cultivo da gleba. A composição de sementes é influenciada pelas práticas culturais adotadas e varia de campo para campo (Fenner, 1985; Benoit et al., 1989, 1992). Dados referentes ao tamanho do banco de sementes em áreas agrícolas variam de valores próximos de zero até mais de um milhão de sementes m^{-2} (Fenner, 1985). Enquanto cada banco pode ser diferente um do outro, algumas similaridades podem ser observadas. Geralmente, os bancos de sementes são compostos por muitas espécies, mas normalmente as poucas espécies dominantes compreendem de 70 a 90% do total de sementes presentes no banco (Wilson, 1988). Estas espécies são consideradas as mais nocivas nos sistemas agrícolas, devido a sua resistência às medidas de controle e capacidade de adaptação a diferentes condições edafoclimáticas. O segundo grupo de espécies compreende entre 10 e 20% do banco de sementes, sendo, em geral, constituído de espécies adaptadas à área geográfica, porém não adaptadas às práticas culturais adotadas naquele campo de produção. O grupo final representa uma pequena porcentagem do total de sementes presentes no banco e inclui sementes recalcitrantes, ou seja, aquelas que não toleram a dessecação, não permanecendo viáveis por períodos prolongados durante o armazenamento, espécies recém introduzidas e sementes da própria cultura que está sendo produzida na área (Wilson et al., 1985).

Muitas comunidades de plantas apresentam, no mínimo, algumas sementes persistentes no solo, embora o tamanho do banco de sementes apresente grande variação de um habitat para outro. Todavia, é possível distinguir certas situações em que bancos de sementes relativamente grandes podem ser encontrados. Em geral, os maiores bancos de sementes (em termos de número de sementes m^{-2}) estão associados com áreas cultivadas, ao passo que os menores bancos de sementes são observados em pradarias, regiões de pântano e reservas florestais. De uma forma geral, o tamanho do banco de sementes (número de sementes m^{-2}) em relação aos diferentes ambientes são os seguintes: áreas cultivadas (20.000 a 40.000), pradarias/pântanos (5.000 a 20.000); florestas temperadas (1.000 a 10.000), florestas tropicais (100 a 1.000), e florestas em regiões montanhosas (10 a 100) (Fenner, 1995).

Os tamanhos dos bancos de sementes são geralmente determinados pela contagem do número total de sementes ou pelo número de sementes germináveis em um dado volume de solo ou em uma determinada área. Amostras são tomadas em determinadas profundidades no campo e transferidas para o laboratório para que sejam analisadas. Caso seja realizada a contagem de todas as sementes presentes na amostra, as sementes necessitam ser separadas do solo por determinados métodos mecânicos, tais como peneiração, flutuação em água, fluxo de ar ou separação manual (Roberts & Ricketts,

1979; Standifer, 1980). Para a estimativa das sementes germináveis, o solo é distribuído em finas camadas sobre bandejas específicas, as quais são colocadas sob condições favoráveis à germinação. Não se pode prever com exatidão se todas as condições providas serão suficientes para induzir a germinação de todas as sementes viáveis. Os resultados são parcialmente direcionados para espécies cujas sementes são prontamente germináveis, e estão na dependência do grau de dormência exibido pelas sementes (Baskin & Baskin, 1985).

2.4 Ocorrência de perdas nos bancos de sementes do solo

Embora as sementes de muitas espécies apresentem potencial para sobrevivência por longos períodos no banco de sementes do solo, a maioria das sementes apresenta longevidade relativamente curta (Murdoch & Ellis, 1992). Os principais fatores que contribuem para a ocorrência de perdas de sementes de plantas daninhas no solo incluem a germinação das sementes, o processo de deterioração e morte das sementes, além da ocorrência de predações. A importância relativa destes mecanismos é variável com as espécies e com as condições ambientais predominantes.

Para o manejo de plantas daninhas, o que realmente interessa é a ocorrência de germinação das sementes e emergência das plântulas. As sementes viáveis resultam em novas plantas capazes de reduzir a produtividade das culturas, caso não sejam controladas a contento. A germinação esporádica no tempo e no espaço é considerada como um mecanismo de sobrevivência de algumas espécies de plantas daninhas. Neste contexto, a ocorrência de dormência nas sementes é considerada como o principal mecanismo regulador deste padrão de variação da germinação no tempo. Diversas causas de dormência foram identificadas nas sementes de inúmeras espécies de invasoras, as quais são enumeradas a seguir.

3. Dormência de Sementes

3.1 Definição

O processo de germinação das sementes depende de uma série de fatores, incluindo os endógenos e aqueles relacionados ao ambiente. A disponibilidade de água, oxigênio, temperatura e, em alguns casos, a presença de luz, são fundamentais para desencadear o processo germinativo. Quando as sementes de determinada espécie, mesmo sendo consideradas viáveis, não germinam, embora sejam fornecidas todas as condições ambientais necessárias para tanto, elas são denominadas dormentes. O estado de dormência não deve ser confundido com o de quiescência, que é um estado de repouso em que, estando viável a semente, é facilmente superado com o fornecimento das condições ambientais necessárias.

A suspensão temporária da germinação não é acidental, ou seja, resulta da ação de mecanismos físicos e fisiológicos que impedem o processo de ger-

minação. Segundo Amen (1968), o estado de dormência é controlado por fatores endógenos e o de quiescência por fatores exógenos. Assim, sementes recém-colhidas de soja perene (*Glycine wightii*) podem apresentar porcentagem de germinação relativamente baixa devido à impermeabilidade do tegumento à água, enquanto que sementes de beldroega (*Portulaca oleracea*) deixam de germinar em virtude de serem sensíveis ao estímulo da luz.

De acordo com Cicero (1986) o período de dormência pode ser de poucos dias, alguns meses ou estender-se por vários anos. Contudo, de qualquer maneira, o fenômeno torna-se menos intenso com o decorrer do tempo até que seja totalmente superado.

3.2 Significado ecológico

Aparentemente, a dormência evoluiu como um mecanismo de sobrevivência da espécie para determinadas condições climáticas. Em regiões de clima temperado, por exemplo, a maior ameaça à sobrevivência é o inverno. Nestas regiões, as sementes em geral amadurecem na primavera, no verão ou no outono. Caso elas germinassem imediatamente, o inverno as surpreenderia em um estágio vulnerável e a espécie seria rapidamente extinta. Geralmente, para qualquer tipo de clima, o fator de ameaça à espécie é o melhor método para superação da dormência. No caso de espécies de clima temperado, deve-se utilizar um inverno artificial, ou seja, submeter as sementes à estratificação ou pré-esfriamento. Em regiões em que predominam condições climáticas que apresentam épocas úmidas alternadas com épocas de seca, deve-se utilizar a secagem e altas temperaturas para superar o estado de dormência das sementes. No caso de regiões desérticas, onde a ameaça às espécies é a escassez de chuvas, o tratamento adequado seria enxaguar as sementes por período de tempo suficiente para remoção dos inibidores químicos, que são os causadores da dormência.

As plantas daninhas constituem um exemplo notório de que a dormência é um mecanismo importante de sobrevivência das espécies. O homem tem procurado controlar sistematicamente tais plantas, por meio de capinas, aplicações de herbicidas ou outras táticas de manejo, entretanto, todos os anos diversas invasoras emergem do solo limpo e cultivado por diversas safras agrícolas. Algumas das sementes podem ter sido introduzidas recentemente, por intermédio dos animais ou por outras formas de dispersão, como o vento ou o escorrimento da água superficial. Contudo, a maioria já estava presente no solo por determinado período de tempo e certamente apresentava algum mecanismo bloqueador da germinação.

Popinigis (1985) cita um exemplo de dormência como mecanismo de sobrevivência bastante interessante, ou seja, o caso das aveias silvestre e cultivada, as quais são espécies muito similares e possuem ciclo vegetativo aparentemente semelhante. Entretanto, a aveia cultivada não sobreviveria por muitas gerações sem a ajuda do homem, enquanto que a aveia silvestre

sobreviveu por vários séculos, apesar de todos os esforços no sentido de erradicá-la. A explicação para tal fato é muito simples, pois a aveia cultivada amadurece no verão e suas sementes apresentam um curto período de dormência, estando aptas para iniciar o processo de germinação logo em seguida. Desta forma, um inverno rigoroso exterminaria suas plântulas. Em contrapartida, a aveia silvestre amadurece aproximadamente na mesma época, porém, apresenta um longo período de dormência impedindo as germinações das sementes. Na primavera seguinte, muitas sementes já não se encontram dormentes e iniciam o processo germinativo, originando plantas invasoras. Caso algumas plântulas venham a morrer devido ao déficit hídrico ou outra condição ambiental adversa, outras sementes ainda dormentes presentes no banco de sementes do solo podem germinar nos anos subsequentes.

3.3 Papel da dormência na manutenção do banco de sementes do solo e como método de distribuição da germinação no tempo

Pelo conceito atual, o fenômeno da dormência é tido como um recurso pelo qual a natureza distribui a germinação das sementes no tempo. As espécies vegetais desenvolveram, juntamente com as sementes, a capacidade de conquistar o espaço e o tempo. Os vegetais conquistaram o espaço por intermédio da produção de sementes, especialmente quando as dotaram de diferentes tipos de apêndices, os quais associados a outras características como o tamanho e a forma, permitiram que as sementes adquirissem mobilidade. Assim, uma pequena semente dotada de aristas, como as sementes de mentrasto (*Ageratum conyzoides*) pode flutuar no ar e movimentar-se a grandes distâncias. Outras sementes, que apresentam formato achatado e fino, podem flutuar na água, sendo por ela transportadas e disseminadas. Desta forma, a germinação de determinada semente pode vir a ocorrer em um local totalmente diferente daquele em que foi produzida, permitindo suportar um maior número de combinações climáticas, o que resultaria em maior possibilidade de sobrevivência da espécie (Carvalho & Nakagawa, 2000; Marcos Filho, 2005).

A dormência contribui decisivamente para a longevidade das espécies de plantas daninhas propagadas por sementes, uma vez que a maioria destas espécies apresenta sementes com algum tipo de dormência. Este fato contribui de maneira decisiva para a manutenção do banco de sementes destas espécies no solo, criando dificuldades bastante acentuadas para o seu controle. Desta forma, torna-se praticamente impossível a erradicação total destas plantas de uma determinada área de cultivo, em virtude da dormência apresentada por certas espécies de invasoras.

A distribuição da capacidade de germinação no tempo não é equitativa e o vegetal manifesta esta característica dotando suas sementes de diferentes intensidades de dormência. Desta forma, se uma determinada espécie

invasora produzisse certo volume de sementes anualmente, em determinada combinação ecológica, ou seja, apresentasse variação da germinação, em função das condições edafoclimáticas e fisiológicas das sementes, a distribuição da intensidade de dormência neste lote de sementes poderia ser bastante diversa. Basicamente, este controle da intensidade de dormência é realizado em nível genético (Vidaver, 1977). Estes fatores genéticos que controlam a intensidade de dormência têm uma grande sensibilidade, determinando grandes diferenças entre sementes que, algumas vezes, são vizinhas no mesmo fruto. O caso que melhor ilustra a sensibilidade destes fatores genéticos no controle da intensidade da dormência foi exemplificado com sementes de *Xanthium stramonium*. Esta espécie possui um fruto com duas sementes: uma dita superior, profundamente dormente, e a outra, inferior, a qual não apresenta dormência alguma (Roberts, 1974).

O banco de sementes do solo consiste de numerosas sementes, muitas das quais são dormentes e retardam a germinação por certo espaço de tempo (Egley & Duke, 1985; Wilson, 1988; Baskin & Baskin, 1989; Egley, 1995). Sementes que são dormentes no momento da sua dispersão da planta-mãe apresentam dormência primária. Estas sementes podem perder a dormência e germinar se as condições tornarem-se favoráveis. Caso as condições sejam inadequadas e a germinação for inibida, as sementes podem ser induzidas à dormência secundária (Bewley & Black, 1994). As sementes que não são dormentes por ocasião da liberação da planta-mãe, também podem se tornar dormentes se o processo de germinação for inibido. Esta transição de sementes dormentes para não dormentes pode se tornar cíclica por vários anos antes de desencadear o processo germinativo ou, em última instância, serem perdidas do banco de sementes do solo (Baskin & Baskin, 1985). O banco de sementes persistente é dinâmico e contém sementes com vários níveis de dormência.

Certas espécies de plantas emergem durante a mesma estação do ano. Esta característica se deve, principalmente, as respostas germinativas das sementes em função dos ciclos sazonais de temperatura do solo. O comportamento cíclico envolve transições graduais entre diferentes graus de dormência das sementes. Segundo (Baskin & Baskin, 1985) estas mudanças cíclicas são descritas como um “conjunto de respostas fisiológicas envolvendo transições graduais”, em que estas transições correspondem às mudanças sazonais de temperatura (Figura 2). Como resultado destes ciclos de dormência, a germinação das sementes limita-se à estação que coincide com a fase de menor dormência no ciclo.

3.4 Tipos de dormência

A dormência de sementes de plantas daninhas tem sido classificada por diversos autores em duas categorias distintas, ou seja, primária e secundária.

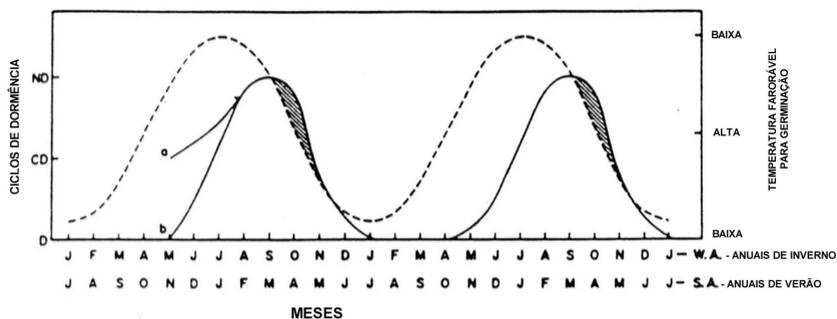


Figura 2. Ciclos anuais de dormência em sementes de plantas daninhas enterradas para espécies estritamente anuais de inverno (W.A.) e anuais de verão (S.A.). Áreas sombreadas no gráfico representam quando a germinação é possível. *D* = dormentes; *CD* = condicionalmente dormentes; *ND* = não dormentes. *a* = sementes condicionalmente dormentes na maturidade; *b* = sementes dormentes na maturidade. Linha sólida = dormência contínua; linha tracejada = temperatura favorável à germinação. Adaptado de [Baskin & Baskin \(1985\)](#).

3.4.1 Dormência primária

A dormência primária é aquela que ocorre por ocasião da maturação das sementes e, portanto, nestas condições, as sementes ainda se encontram fisiologicamente ligadas à planta-mãe. Este tipo de dormência ocorre durante períodos relativamente curtos, os quais podem variar de algumas semanas a poucos meses, sendo importante para muitas espécies, pois impede que as sementes germinem quando ainda estão ligadas à própria planta (fenômeno da viviparidade), caso as condições climáticas sejam desfavoráveis por ocasião do seu completo desenvolvimento ou no momento da sua dispersão. Em geral, este tipo de dormência é facilmente superado por simples armazenamento das sementes secas por algum tempo, geralmente não muito longo. Desta forma, imediatamente após a maturação, as sementes não germinam, todavia, após um período de armazenamento, adquirem a capacidade de germinação. Este tipo de dormência é comumente denominado de “dormência pós-colheita”. Exceção a esta regra ocorre para sementes de tiririca (*Cyperus rotundus*), que necessitam de um período relativamente longo de armazenamento das sementes, aproximadamente 7 anos, para a completa superação da dormência ou, então, a utilização de tratamento químico (escarificação ácida com H_2SO_4 por 15 minutos) ([Popinigis, 1985](#); [Marcos Filho, 2005](#)).

3.4.2 Dormência secundária

Em algumas espécies, sementes que apresentam a capacidade de germinar normalmente podem ser induzidas a entrar no estado dormente, quando mantidas, durante certo intervalo de tempo, sob condições ambientais desfavoráveis.

Geralmente, a dormência secundária é induzida quando são fornecidas à semente todas as condições necessárias à sua germinação exceto uma. Villiers (1972) cita o exemplo em que sementes de *Xanthium* spp. são induzidas à dormência secundária quando submetidas a baixa tensão de oxigênio. Segundo Popinigis (1985), altas tensões de gás carbônico podem causar dormência secundária em sementes de mostarda branca (*Brassica alba*). Outras condições que podem induzir dormência secundária nas sementes de algumas espécies são temperaturas elevadas ou muito baixas, iluminação ou ausência de luz e secagem utilizando altas temperaturas, entre outras.

Segundo Bewley & Black (1994), para que ocorra a superação da dormência, as sementes devem experimentar certos fatores ambientais ou sofrer certas mudanças metabólicas. Portanto, o controle da germinação ocorre em dois níveis. O primeiro é relatado como um estado próprio da semente (dormência primária) e o segundo envolve a atuação de fatores ambientais (dormência secundária). Estes controles são chamados de “interno” e “externo”, respectivamente. O relacionamento entre os dois tipos de dormência e a germinação das sementes está ilustrado na Figura 3.

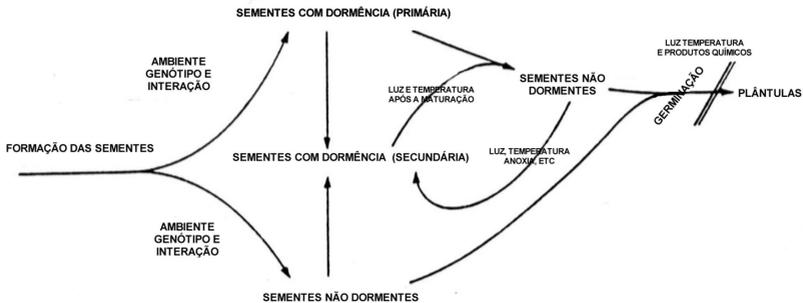


Figura 3. Controle da dormência e germinação das sementes. Adaptado de Bewley & Black (1994).

3.5 Causas da dormência

A dormência das sementes não ocorre devido a uma simples causa ou mecanismo, muito embora a consequência final do processo seja a mesma. É fundamental que se conheça a causa da dormência, para que se possa

planejar ou escolher um método para superá-la, ou ainda, compreender porque as sementes de diversas espécies de plantas daninhas não germinam uniformemente, o que, seguramente, facilitaria o seu controle.

A dormência das sementes pode ser classificada, de acordo com o mecanismo ou a localização do bloqueador ou inibidor, da seguinte maneira: embrião imaturo ou rudimentar, impermeabilidade do tegumento à água, impermeabilidade ao oxigênio, restrições mecânicas, embrião dormente, dormência devido a inibidores internos e combinação de causas.

3.5.1 Embrião imaturo ou rudimentar

Embriões de sementes de várias espécies apresentam-se morfologicamente imaturos por ocasião da dispersão das sementes da planta e requerem um determinado período para o seu completo desenvolvimento. Somente após este intervalo, as sementes estarão aptas a desencadear o processo germinativo.

Os embriões imaturos são, em geral, relativamente pouco desenvolvidos e, em alguns casos, não totalmente diferenciados. Normalmente, há necessidade de um período de três a quatro meses para que seja completado o seu desenvolvimento. Quando estas sementes são colocadas para germinar, ou sob condições específicas, a germinação é retardada, até que o embrião, sofrendo modificações anatômicas e morfológicas adicionais, complete sua diferenciação ou crescimento.

O embrião rudimentar consiste de uma massa de células não diferenciadas, sendo necessário que ocorra sua diferenciação antes que a germinação seja possível. Quando o embrião já se encontra diferenciado, porém somente retoma o crescimento quando a semente se reidrata, não germinando antes que tenha atingido determinado tamanho, é denominado imaturo.

Exemplos típicos de plantas daninhas com embrião imaturo e que são incapazes de germinação imediata ocorrem em sementes de *Polygonum* spp. e *Scirpus* spp. (Zimdahl, 1993).

3.5.2 Impermeabilidade do tegumento à água

Sementes que não absorvem água quando colocadas em condições favoráveis para tal, em virtude da presença de tegumentos impermeáveis, são conhecidas como “sementes duras”. Do ponto de vista de perpetuação da espécie, esta característica é extremamente benéfica, não apenas pelo fato das sementes permanecerem vivas por um longo período, mas também porque, sob condições naturais, tornam-se permeáveis individualmente em períodos diferentes após a sua dispersão. Esta causa de dormência é bastante comum em sementes de inúmeras espécies de plantas daninhas, principalmente naquelas pertencentes às famílias Fabaceae, Malvaceae, Geraniaceae, Chenopodiaceae, Convolvulaceae, Solanaceae e Liliaceae, favorecendo a formação de bancos de sementes no solo.

Os trabalhos de pesquisa voltados para determinar qual a região do tegumento é responsável pela impermeabilidade à água têm sido conduzidos principalmente com sementes de fabáceas, nas quais a testa se constitui na barreira contra absorção da água (Bewley & Black, 1994). A testa das fabáceas não é, evidentemente, um tecido uniforme, pois nela estão presentes o hilo, o estrofiolo e a micrópila. Diversos pesquisadores, estudando a ocorrência de impermeabilidade do tegumento das fabáceas à água, verificaram que o hilo funciona como uma válvula, auxiliando a saída de água da semente, sem permitir a absorção de umidade. O estrofiolo parece ser o principal local de penetração de água nas sementes.

A ocorrência de sementes duras tem sido atribuída tanto a fatores genéticos como ambientais. Crocker & Barton (1957) relatam que em coleções de trevo doce (*Melilotus alba*) havia uma variação de aproximadamente 98% no número de sementes duras produzidas em diferentes anos nas mesmas plantas. Entretanto, relataram não haver qualquer evidência na hereditariedade da impermeabilidade em sementes de trevo vermelho (*Trifolium incarnatum*). Os mesmos autores, estudando os fatores ambientais que podem afetar a produção de sementes duras nesta espécie, verificaram que existe correlação entre a sequência de florescimento e a quantidade de sementes pequenas produzidas e, entre o tamanho da semente e a permeabilidade do tegumento. Quando as condições climáticas favoreciam a produção de sementes pequenas, as mesmas apresentavam impermeabilidade do tegumento. Por outro lado, um suprimento extra de cálcio também proporcionou aumento no número de sementes duras daquela espécie, ao passo que a redução na intensidade luminosa e suprimento hídrico não ocasionaram efeitos sobre o tegumento das sementes.

Em contrapartida, Bewley & Black (1994) relataram que a taxa e o grau de secagem das sementes são particularmente importantes neste mecanismo, para algumas espécies de fabáceas, pois os tegumentos tornam-se progressivamente duros e impermeáveis à medida que o grau de umidade das sementes diminui. A presença de oxigênio durante a perda de umidade das sementes parece ser igualmente importante.

3.5.3 Impermeabilidade ao oxigênio

As sementes de muitas espécies, particularmente as poáceas, apresentam restrições impostas pelo tegumento à absorção de oxigênio, a liberação do gás carbônico ou a ambos os mecanismos, fato este que impede a germinação das sementes.

Segundo Popinigis (1985), esta causa de dormência é particularmente importante para muitas espécies de poáceas. Nestas, a germinação é obtida removendo-se ou danificando-se as cariopses, por meio de escarificação, cortes, remoção, tratamento com ácidos, ou submetendo as sementes a condições de alta tensão de oxigênio. De acordo com Carvalho & Nakagawa

(2000), as diversas espécies de *Brachiaria* spp., tais como *B. humidicola*, *B. decumbens* e *B. brizantha*, apresentam este tipo de dormência.

Bewley & Black (1994) apontam os seguintes fatores responsáveis pela impermeabilidade ao oxigênio: presença de mucilagem envolvendo o tegumento e consumo de oxigênio pelo próprio tegumento, reduzindo, desta forma, a quantidade disponível para o embrião. De acordo com estes mesmos autores, o consumo de oxigênio pelo tegumento, em algumas espécies, é atribuído à oxidação de vários compostos fenólicos, tais como floridzin, ácido clorogênico e ácido *p*-cumaril-shiquímico, reconhecidamente presentes na testa.

Com relação à impermeabilidade ao gás carbônico, Bewley & Black (1994) afirmam que existem poucas evidências da relação entre dormência imposta pela ação dos tegumentos e o acúmulo de CO₂ no interior das sementes. Estes autores apontam que em diversos relatos foi verificado que a germinação pode tornar-se inibida em altas concentrações de gás carbônico, na ordem de 20 a 40%. Por outro lado, Mayer & Poljakoff-Mayber (1989) relataram que são conhecidos exemplos em que os tegumentos das sementes apresentam diferenças na permeabilidade ao oxigênio e ao gás carbônico.

A germinação das sementes de aveia silvestre (*Avena fatua*) pode ser intensamente suprimida pela redução da disponibilidade de oxigênio causada pela compactação do solo (Klingman et al., 1982). A compactação do solo e o excesso de umidade são condições que reduzem a germinação das sementes de diversas espécies de plantas daninhas e o mecanismo responsável pode ser a redução da pressão parcial de oxigênio (Zimdahl, 1993).

Segundo Klingman et al. (1982) e Zimdahl (1993), caruru (*Amaranthus retroflexus*), aveia silvestre (*Avena fatua*), bolsa-de-pastor (*Capsella bursa-pastoris*) e *Lepidium campestre* são exemplos típicos de espécies de plantas daninhas que apresentam dormência nas sementes por impermeabilidade do tegumento à água, ao oxigênio ou a ambos os mecanismos.

3.5.4 Restrições mecânicas

Segundo Egley & Duke (1985), o tegumento das sementes e outras estruturas envoltórias do embrião são extremamente importantes, tanto na sobrevivência quanto na regulação do processo de germinação das sementes de plantas daninhas. Pelo fato do tegumento das sementes ser a principal forma de defesa do embrião contra os perigos impostos pelas variações do ambiente, não é surpreendente que ele possa impor barreiras a germinação rápida e precoce. Portanto, as estruturas protetoras que envolvem o embrião podem apresentar duas funções, ou seja, proteção do eixo embrionário e regulação do tempo de germinação das sementes.

A idéia de que o tegumento ou cobertura protetora pode apresentar suficiente resistência mecânica capaz de impedir o crescimento do embrião, baseia-se no fato de que, em muitos casos, a germinação das sementes

dormentes pode ser obtida danificando, removendo ou perfurando o tegumento, cariopse ou cobertura protetora.

Estas restrições mecânicas são sugeridas como causa de dormência de diversas espécies de poáceas, como por exemplo, em capim pensacola (*Paspalum notatum*) (Popinigis, 1985).

De acordo com Copeland & McDonald (1985), este tipo de dormência têm sido descrita em sementes de caruru (*Amaranthus retroflexus*). Entretanto, deve-se levar em consideração que o tegumento das sementes é, muitas vezes, fonte de substâncias inibidoras que podem ser eliminadas durante a remoção da cobertura protetora.

3.5.5 Embrião dormente

Caracterizado por ser o próprio embrião a sede da dormência. É resultante de condições fisiológicas no embrião, ainda não totalmente elucidadas. As sementes enquadradas neste tipo de mecanismo são as que apresentam exigências especiais quanto à luz e resfriamento para superação da dormência, ou cujas causas são inibidores químicos. As sementes cuja germinação é afetada pela luz podem ter sua germinação promovida ou inibida pela mesma. No primeiro caso, são denominadas “fotoblásticas positivas”, e no segundo, “fotoblásticas negativas”.

Nas sementes que exigem resfriamento, extraindo-se o embrião da semente, este pode permanecer dormente, ou crescer lentamente. A superação da dormência é obtida pelo processo de estratificação ou pré-esfriamento, que consiste em umedecer a semente e submetê-la a baixas temperaturas. Porém, acima de 0°C, por períodos que variam conforme as espécies. O tratamento das sementes com ácido giberélico (GA₃) pode substituir a estratificação.

Segundo (Popinigis, 1985) a dormência do embrião é frequentemente associada à presença de substâncias químicas inibidoras da germinação. Estas substâncias atuam em interação com fatores ambientais, tais como temperatura e disponibilidade de oxigênio. Entre os inibidores identificados destaca-se o ácido abscísico (ABA), encontrado não apenas nos embriões, mas também nos tegumentos.

Este tipo de dormência é particularmente comum em algumas espécies de invasoras, tais como diversas poáceas, mostarda e *Polygonum* spp. (Klingman et al., 1982).

3.5.6 Dormência promovida por inibidores internos

A germinação das sementes de muitas espécies é algumas vezes reduzida ou impedida pela presença de compostos conhecidos como inibidores. Os mais importantes são o ácido abscísico (ABA), as lactonas insaturadas, como a cumarina, e vários compostos fenólicos. Segundo Khan (1980), os inibidores de germinação podem estar presentes em diversas partes da semente, principalmente pericarpo, testa, endosperma e embrião.

Os inibidores da germinação são constituídos de uma grande variedade de compostos químicos. As funções fisiológicas e bioquímicas de muitas substâncias não são conhecidas com exatidão. Acredita-se que o ABA esteja envolvido na inibição da síntese de RNA e de proteínas e que vários compostos fenólicos possam atuar como inibidores da divisão celular ou consumir oxigênio durante o processo de oxidação, restringindo, desta forma, a quantidade de oxigênio disponível para o desenvolvimento do embrião (Bewley & Black, 1994).

A dormência tem sido definida como resultado de um equilíbrio entre substâncias inibidoras da germinação, tais como o ácido abscísico e a cumarina e substâncias que estimulam a germinação, tais como o ácido giberélico (GA_3), as citocininas e o etileno (Copeland & McDonald, 1985; Egley & Duke, 1985; Popinigis, 1985; Taylorson, 1987; Mayer & Poljakoff-Mayber, 1989). Para que a germinação ocorra, é necessário que haja o restabelecimento do desequilíbrio favorável às giberelinas, em que estas não exerceriam papel direto algum, apesar do equilíbrio ser alcançado por meio do fornecimento de giberelinas exógenas. Outro grupo de hormônios, as citocininas, é que desempenharia um papel promissor sobre a germinação das sementes, ou seja, anularia os efeitos provocados pelos inibidores (Carvalho & Nakagawa, 2000; Marcos Filho, 2005).

A luz é outro fator que desempenha um importante papel no processo de quebra da dormência provocada por inibidores internos, pois sua ação seria levar o fitocromo da forma inativa (PV ou P660) à ativa (PvD ou P730), que liberaria ou ativaria, por um processo desconhecido, as citocininas. Estas, agindo antagonisticamente em relação a diversos inibidores, permitiriam às giberelinas desempenhar várias funções, tanto no tecido endospermático como no embrionário, funções estas relacionadas com a germinação das sementes (Bewley & Black, 1994; Carvalho & Nakagawa, 2000; Marcos Filho, 2005).

Esquemáticamente, a interconversão das duas formas do fitocromo poderia ser representada de acordo com a Figura 4.

Outro fator importante no processo de dormência promovida por inibidores internos é a temperatura. Segundo Thomas (1980), foi verificado que durante o tratamento de pré-esfriamento ocorria um decréscimo inicial dos inibidores de germinação, seguido por um aumento sequencial de citocininas e giberelinas.

O etileno também está envolvido na quebra da dormência resultante do equilíbrio entre substâncias inibidoras e promotoras da germinação. Existem evidências de que a presença de etileno atenua a exigência de temperaturas específicas para a germinação das sementes de algumas espécies, afetando os níveis de citocininas e auxinas e agindo sinergisticamente com giberelinas e luz (Olatoye & Hall, 1972). Schonbeck & Egley (1981) observaram que sementes de caruru (*Amaranthus retroflexus*) tem exigências

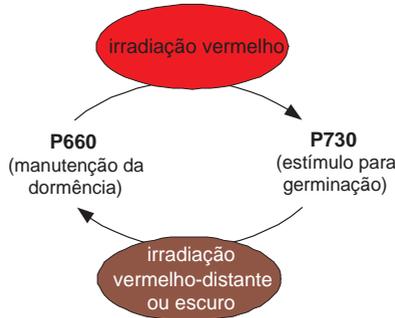


Figura 4. Interconversão das duas formas do fitocromo.

variáveis na sensibilidade ao etileno, de acordo com as condições do pretratamento.

3.5.7 Combinação de causas

A presença de uma causa de dormência em uma semente não elimina a possibilidade de que outras também estejam presentes. Neste caso, serão também necessárias combinações de tratamentos para superar a condição de dormência. Existem evidências de que sementes de *Panicum* spp., *Paspalum* spp. e *Brachiaria* spp. apresentam embriões imaturos, impermeabilidade a gases e inibidores de germinação. Sementes de trevo subterrâneo (*Trifolium subterraneum*) apresentam dois tipos de causas de dormência (impermeabilidade a água e inibidores endógenos) (Cicero, 1986).

3.6 Métodos para superação da dormência

O método a ser empregado na superação das diferentes causas depende do tipo de dormência presente nas sementes. Na Tabela 1 são apresentados os principais métodos empregados na superação dos diferentes mecanismos de dormência.

A descrição sumária das técnicas mais comumente empregadas na superação da dormência é apresentada a seguir.

3.6.1 Escarificação mecânica

Consiste em submeter as sementes contra superfícies abrasivas, tais como lixa ou pedra de carbonato de silício, com o objetivo de desgastar ou eliminar parte do tegumento das sementes.

A escarificação não deve ser muito severa, pois poderá provocar injúrias ao embrião, prejudicando o desempenho germinativo. A escarificação mecânica é empregada basicamente na superação da dormência de sementes

Tabela 1. Métodos de superação dos principais mecanismos de dormência em sementes. Fonte: Popinigis (1985).

Tipo de dormência	Métodos de superação
Impermeabilidade e restrições mecânicas do tegumento	Imersão em solventes (água quente, álcool, acetona, etc.) Escarificação mecânica Escarificação com ácido sulfúrico Resfriamento rápido Exposição à alta temperatura Aumento da tensão de oxigênio Choques ou impactos contra superfícies rígidas
Embrião dormente	Estratificação à baixa temperatura Tratamento com hormônios (giberelinas ou citocininas)
Dormência em poáceas	Rompimento da cariopse Tratamento com nitrato de potássio Exposição à luz Emprego de temperaturas alternadas Aplicação de pré-esfriamento Aumento da tensão de oxigênio Tratamento com hormônios Germinação à temperatura subótima
Tegumento impermeável combinado com embrião dormente	Escarificação mecânica ou com ácido sulfúrico, seguida de estratificação à baixa temperatura
Dormência dupla (epicótilo e radícula dormentes)	Estratificações a baixas temperaturas seguidas de condições favoráveis para o crescimento da radícula e do epicótilo, respectivamente

que apresentam tegumento impermeável à água (sementes duras), como é o caso da maioria das espécies de plantas daninhas pertencentes à família Fabaceae.

3.6.2 Escarificação ácida

Este método consiste em submergir as sementes em ácido sulfúrico concentrado por um determinado intervalo de tempo e, a seguir, lavar em água corrente e secar. Este tipo de escarificação é recomendado na superação da dormência de sementes que apresentam tegumentos impermeáveis à água ou a gases.

A utilização do ácido sulfúrico na escarificação química de sementes, indicado principalmente para algumas espécies de poáceas como, por exem-

plo, *Brachiaria* spp., somente apresenta viabilidade prática quando realizada em laboratórios de análise de sementes e utilizando todas as medidas de segurança. Caso contrário, apresenta o perigo de queimaduras ao técnico ou funcionário que executa a operação, além de contaminação do meio ambiente, em virtude de seu elevado poder corrosivo e sua violenta reação com a água.

O tempo de submersão no ácido é crítico e deve ser cuidadosamente determinado para os diferentes lotes de sementes a serem escarificadas. Segundo (Popinigis, 1985), este intervalo de tempo pode variar de alguns minutos a várias horas, dependendo da espécie. Normalmente são utilizadas duas partes do ácido para uma parte de sementes. Em seguida, a mistura sementes-ácido deve ser lentamente agitada, com a finalidade de homogeneizar o tratamento. Após o tratamento, o ácido deve ser eliminado e as sementes lavadas em água corrente por um período de aproximadamente 10 minutos.

3.6.3 Escarificação térmica

O tratamento consiste na imersão das sementes em água com temperatura variando entre 60 e 100°C, durante um intervalo de tempo previamente determinado, o qual é variável conforme a espécie a ser tratada.

3.6.4 Lavagem em água corrente

Este método é empregado para espécies cujas sementes apresentam algumas substâncias inibidoras solúveis em água, as quais podem ser removidas pela simples lavagem das sementes em água corrente, durante um intervalo de tempo variável com a espécie.

Para algumas espécies, o simples enterrio das sementes de plantas daninhas já é considerado suficiente para a superação deste tipo de dormência, pelo fato da maioria dos inibidores serem adsorvidos pelas partículas do solo.

3.6.5 Secagem prévia

Sementes recém colhidas de determinadas espécies de poáceas eliminam a sua dormência pós-colheita, quando submetidas a secagem por algumas semanas em condições de câmara seca, ou em ambiente a 40°C com livre circulação de ar por, aproximadamente, uma semana (Brasil, 2009).

3.6.6 Pré-esfriamento

Sementes de algumas espécies de poáceas, como *Agrostis* spp., *Lolium* spp., entre outras, além de algumas espécies de *Brassica* (Tabela 2), como a mostarda e nabiça, superam a dormência quando submetidas a baixas temperaturas. Para tanto, as sementes devem estar embebidas.

Em laboratório, estas condições podem ser simuladas colocando as sementes em substrato umedecido e levando-as para uma câmara previa-

mente regulada à temperatura de 5 a 10°C, permanecendo nestas condições por um período de tempo variável conforme a espécie (Popinigis, 1985).

Tabela 2. Pré-esfriamento indicado para superação da dormência das sementes de algumas espécies de *Brassica*. Fonte: Brasil (2009).

Espécie	Temperaturas e dias necessários
<i>B. campestris</i>	5 ou 10°C por 7 dias
<i>B. juncea</i>	10°C por 7 dias
<i>B. napus</i>	5 ou 10°C por 7 dias
<i>B. nigra</i>	10°C por 3 dias
<i>B. oleracea</i>	10°C por 3 dias

3.6.7 Estratificação

Este tratamento é empregado na superação da dormência de diversas espécies arbustivas, com a finalidade de promover determinadas modificações fisiológicas no embrião. Para tanto, as sementes são colocadas em determinados recipientes que permitem a aeração, mas evitam o ressecamento. As embalagens devem ser colocadas em câmara refrigerada ou enterradas no solo como é o caso de regiões de clima frio, sendo deixadas em repouso pelo período recomendado para a espécie.

As temperaturas normalmente empregadas na estratificação situam-se entre 2 e 7°C (Popinigis, 1985). No caso de sementes de algumas espécies de plantas daninhas comuns em regiões temperadas, o próprio período de inverno é suficiente para a superação da dormência, atuando como um tratamento de estratificação (Egley & Duke, 1985).

3.6.8 Produtos químicos

Alguns produtos químicos tais como nitrato de potássio (KNO₃), ácido giberélico (GA₃), peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e etileno são indicados para o tratamento de superação da dormência das sementes de inúmeras espécies. Porém, este tipo de tratamento só é viável economicamente em condições bastante específicas, tais como em laboratório de análise de sementes e para pequenos volumes de sementes.

O peróxido de hidrogênio tem sido utilizado no tratamento de sementes de algumas poáceas e tem se mostrado efetivo como estimulante da germinação. Por outro lado, o etileno é recomendado para o tratamento de diversas espécies, sendo que a concentração utilizada varia de 10 a 100 ppm, dependendo da espécie (Cicero, 1986). As concentrações de ácido giberélico utilizadas para superação de alguns tipos de dormência são bem mais elevadas, não sendo viáveis para determinadas quantidades de sementes.

3.6.9 Temperaturas alternadas

As Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009) prescrevem para o teste de germinação, temperaturas alternadas para um grande número de espécies que apresentam dormência. A alternância de temperatura, que ocorre naturalmente em condições de campo, ao que tudo indica age sobre os tegumentos das sementes tornando-os mais permeáveis à água e ao oxigênio e parece apresentar, também, influência sobre o equilíbrio entre as substâncias promotoras e inibidoras da germinação (Cicero, 1986).

3.6.10 Exposição à luz

Sementes de muitas espécies são sensíveis à luz (fotoblásticas positivas) e não germinam na sua ausência ou apresentam germinação muito reduzida nesta condição. Em laboratórios de análise de sementes, para espécies exigentes em luz, o teste de germinação é, normalmente, conduzido em substrato úmido, em que as sementes não são cobertas com papel-toalha e devem ser iluminadas. A intensidade da luz deve estar entre 750 e 1.250 lux, e as sementes devem ser submetidas à iluminação pelo menos 8 em cada 24 horas.

Sementes de alface (*Lactuca sativa*) e diversas espécies de poáceas, tais como *Agropyron* spp., *Agrostis* spp., *Axonopus* spp., *Bromus* spp., *Festuca* spp., *Lolium* spp. e *Poa* spp. são alguns exemplos de espécies cujas sementes são sensíveis à luz (Popinigis, 1985).

3.7 Teorias da dormência

O mecanismo de dormência das sementes apresenta peculiaridades para diferentes espécies de plantas, tornando difícil qualquer generalização a respeito de suas causas. Entretanto, diversas teorias têm sido propostas para explicar a dormência como resultado de uma única causa.

A teoria mais antiga foi proposta por Amen (1968). Este pesquisador sugeriu que todos os tipos de dormência conhecidos possuem um mesmo mecanismo de controle. Neste contexto, o estabelecimento, o controle e a superação da dormência das sementes seriam regulados pelo equilíbrio entre substâncias inibidoras e promotoras da germinação. O referido modelo envolve quatro fases distintas, ou seja: indutiva, mantenedora, disparadora e germinativa. Os reguladores endógenos de crescimento seriam as gibberelinas, as citocininas e vários inibidores. Neste caso, o estabelecimento do mecanismo de dormência ocorreria por um desequilíbrio em favor dos inibidores, enquanto que na superação do estado, o desequilíbrio favoreceria os promotores.

Khan (1971) propôs outra teoria em que a dormência das sementes seria controlada por substâncias reguladoras do crescimento, sendo que as gibberelinas seriam responsáveis pela promoção da germinação. As citocininas apresentariam ação “permissiva” ou de anulação do efeito das substâncias inibidoras, porém sem promover a germinação. Os inibidores, por sua vez,

impediriam o processo germinativo. Neste caso, a dormência resultaria não apenas do excesso de inibidores, mas também da ausência de giberelinas na ausência de inibidores ou, então, pela ausência de citocininas na presença de substâncias inibidoras (Figura 5).

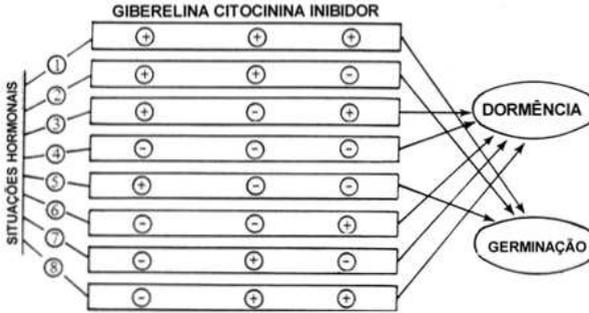


Figura 5. Modelo de mecanismo hormonal da dormência e germinação das sementes, utilizando giberelinas, citocininas e inibidores. São mostradas oito situações hormonais ou fisiológicas encontradas nas sementes. A presença de algum tipo de hormônio em concentrações fisiologicamente ativas é designada com o sinal positivo e sua ausência, com o sinal negativo. Adaptado de Khan (1971).

De acordo com Roberts (1973), o estado de dormência das sementes é provocado pela restrição na respiração, por meio do ciclo das pentoses, indispensável à ocorrência da germinação. Bewley & Black (1994) sugerem um controle genético da dormência das sementes, por meio da observação de uma grande diversidade de níveis de dormência em populações naturais de aveia silvestre (*Avena fatua*). Embora existam algumas evidências em favor das teorias propostas, nenhuma foi totalmente comprovada, até o presente momento.

3.8 Consequências da dormência em sementes e possibilidade de uso no manejo de plantas daninhas

A dormência é considerada um importante mecanismo de sobrevivência das sementes por longos períodos no solo, sendo considerada uma contínua fonte de infestação de plantas daninhas. O mecanismo de dormência das sementes assegura a sobrevivência de muitas espécies de invasoras por muitos anos, contribuindo para a manutenção dos bancos de sementes no solo.

A maior parte das causas da dormência, além dos principais métodos empregados na sua superação, são bastante conhecidos, entretanto, o seu

uso no manejo de plantas daninhas permanece, ainda, obscuro. Em laboratório, os tratamentos utilizados na quebra da dormência das sementes de inúmeras espécies de plantas daninhas são rotineiramente empregados. Estes métodos, segundo Zimdahl (1993), são classificados, de uma forma geral, em métodos abrasivos, manipulação da temperatura e métodos químicos.

Contudo, em condições de campo o problema da dormência torna-se mais difícil de ser solucionado. Métodos empregados em laboratório não são adequados para operações de cultivo em áreas destinadas a produção, pelo fato de que as sementes de plantas daninhas não podem ser reconhecidas nestas condições. O preparo do solo é uma boa alternativa para superação da dormência, enquanto que o não revolvimento é uma maneira satisfatória de manutenção da dormência de sementes enterradas. Desta forma, o cultivo do solo expõe as sementes à luz e às mudanças de temperatura.

Práticas culturais não são seletivas e afetam todas as sementes; portanto, em algumas espécies a dormência pode ser promovida com o preparo do solo, enquanto que em outras ela pode ser superada. O manejo de plantas daninhas deve continuar enfatizando o controle das invasoras até que obtenha uma melhor compreensão do processo de dormência nas sementes e desenvolvam métodos que utilizem este mecanismo nas táticas de manejo cultural (Zimdahl, 1993). Para efeito de controle das plantas daninhas seria interessante que o máximo de sementes germinasse simultaneamente, ou seja, que os mecanismos de dormência pudessem ser manipulados no sentido de uniformizar a germinação e facilitar o controle.

Algumas alternativas de manejo que têm mostrado resultados satisfatórios no controle de plantas daninhas são o plantio direto e o preparo do solo à noite, principalmente para evitar a germinação de sementes cujo mecanismo de dormência seria a sensibilidade das sementes à luz. Neste caso, sementes fotoblásticas positivas de algumas espécies de invasoras seriam mantidas em seu estado de repouso com o não revolvimento do solo em áreas de plantio direto, contribuindo substancialmente para maximizar o seu controle.

Segundo Radosevich et al. (1996) a cobertura do solo tem sido utilizada para reduzir a abundância de plantas daninhas, por meio da manipulação dos requerimentos das sementes para a quebra da dormência. De acordo com estes mesmos autores, sementes de *Lolium* spp. apresentam requerimentos particulares de luz e temperatura para germinação, a qual pode ser interrompida pela presença da cobertura vegetal no solo. Desta forma, a cobertura do solo promovida pelo plantio direto na cultura do trigo pode propiciar um controle substancial da população desta invasora.

Outra possibilidade de utilização da dormência das sementes no manejo de plantas daninhas seria a aplicação de produtos químicos no solo visando uniformizar a germinação das sementes e propiciar um controle mais efetivo com herbicidas. Contudo, esta prática não tem se mostrado

economicamente viável, em virtude do alto custo de determinados produtos utilizados para esta finalidade, como o etileno, sais de nitrato e ácido giberélico, contribuindo para o aumento dos custos de produção das culturas. Apenas o etileno tem sido utilizado com relativo sucesso em aplicações de larga escala no solo para o controle de determinadas espécies de invasoras nos Estados Unidos.

4. Longevidade das Sementes de Plantas Daninhas no Solo

Diversas condições afetam a longevidade das sementes de invasoras no solo. Uma vez que a germinação é, aparentemente, o destino predominante das sementes de plantas daninhas, os fatores que favorecem este processo podem reduzir a longevidade e a persistência das sementes no solo (Roberts, 1974).

A persistência das sementes de plantas daninhas pode ser reduzida significativamente pelas operações de preparo do solo (Roberts & Feast, 1973). De acordo com os trabalhos conduzidos por Roberts & Dawkins (1967) e Roberts & Neilson (1981), na ausência de ressemeadura ou dispersão, as sementes de plantas daninhas em solos cultivados foram reduzidas em aproximadamente 25% ao ano. Em geral, sementes enterradas próximo da superfície do solo perdem a sua viabilidade mais rapidamente do que aquelas sementes enterradas em maiores profundidades (Toole, 1946). Em consonância, altas temperaturas do solo também favorecem a perda de viabilidade das sementes (Schafer & Chilcote, 1970).

Roberts (1983) verificou que as taxas máximas de deterioração (aproximadamente 45% ao ano) ocorreram quando o preparo solo foi realizado várias vezes ao ano. As menores taxas de deterioração (aproximadamente 25% ao ano) ocorreram quando o solo não foi revolvido. Taxas de 50% ao ano indicam que após sete anos, a população de sementes no solo poderá ser de aproximadamente 1% daquela presente inicialmente.

Nem todas as espécies de invasoras são capazes de apresentar prolongada persistência no solo. De fato, sob condições de cultivo o período médio de viabilidade das sementes para muitas espécies é superior a cinco anos (Egley & Chandler, 1983).

Estudos sobre a longevidade de sementes de plantas daninhas em solos não perturbados indicaram que as sementes de *Rumex crispus*, *Oenothera biennis* e *Verbascum blattaria* permaneceram viáveis após oitenta anos (Darlington & Steinbauer, 1961). Em outro trabalho, sementes de *Chenopodium album* e *Ranunculus repens* permaneceram viáveis por pelo menos vinte anos (Lewis, 1973). Dawson & Bruns (1975) verificaram que algumas sementes de poáceas invasoras (*Echinochloa crus-galli*, *Setaria viridis* e *S. lutescens*) permaneceram viáveis no solo por aproximadamente treze anos.

Villiers (1974) propôs uma hipótese de que sementes hidratadas, porém não germinadas, podem estender o seu período de viabilidade por meio de processos de reparação ou substituição de componentes celulares, tais como DNA, enzimas e membranas, os quais podem ajudar a explicar como as sementes de algumas espécies de invasoras podem permanecer viáveis no solo por períodos bastante prolongados. O mesmo autor sugeriu que as sementes podem sofrer danos, como, por exemplo, desorganização do sistema de endomembranas, porém os danos podem ser reparados ou componentes celulares essenciais podem ser substituídos em sementes hidratadas, durante o armazenamento. Sementes secas abaixo de um determinado nível crítico não apresentam umidade suficiente para suportar o metabolismo necessário para o processo de reparação.

Danos ao sistema de membranas ou falhas aparentemente ocorrem, em alguma extensão, durante os estádios iniciais de germinação, em virtude da perda de solutos celulares provocados pela rápida embebição em sementes deterioradas (Duke & Kakefuda, 1981). Evidências ultraestruturais que suportam a hipótese de Villiers (1974) a respeito de danos às membranas e regeneração foram obtidas com sementes de alface (*Lactuca sativa*) e *Fragaria* spp. (Villiers & Edgumbe, 1975).

5. Manipulação Química da Dormência em Sementes de Plantas Daninhas

A manipulação da dormência das sementes de inúmeras espécies de plantas daninhas por meio da utilização de produtos químicos é uma alternativa de manejo que oferece boas possibilidades de sucesso, visando promover um controle mais eficiente das invasoras com herbicidas. O desenvolvimento de tal tecnologia vai estar na dependência do conhecimento adequado dos mecanismos de dormência da espécie alvo e da descoberta de novas substâncias que apresentem alta atividade na superação da dormência das sementes.

Diversos produtos químicos têm sido testados em laboratório com relativo sucesso na superação de inúmeros mecanismos de dormência utilizados por diferentes espécies de invasoras. Contudo, o desenvolvimento de uma técnica simples, de baixo custo e que ofereça possibilidade de uso em larga escala nos campos de produção, ainda necessita ser melhor pesquisada. Segundo Taylorson (1987) os compostos químicos mais comumente utilizados em trabalhos experimentais têm sido as substâncias nitrogenadas (aminoácidos, amônio, azidas, cianamidas, hidroxilaminas, nitrato, nitrito, tiouréia e uréia), reguladores de crescimento (ácido giberélico, citocininas e etileno), herbicidas e compostos químicos que inibem a germinação (ácido abscísico).

Um exemplo de estimulante da germinação que tem sido utilizado com sucesso no campo para aumentar a eficiência no controle de plantas daninhas é o etileno. Aplicações de etileno induziram a germinação das se-

mentes de *Striga asiatica* e reduziram o número de sementes viáveis desta parasita de plantas em solos da Carolina do Norte e Carolina do Sul, nos Estados Unidos (Eplee, 1975). *S. asiatica* é uma planta daninha considerada como parasita obrigatório de raízes de milho (*Zea mays*) e várias outras poáceas de verão. As sementes desta invasora normalmente não germinam antes de estarem bastante próximas das raízes das plantas hospedeiras que exudam um estimulante para sua germinação. Uma vez que o etileno estimulou a germinação das sementes desta espécie de invasora no solo, na ausência das raízes da planta hospedeira, um método de controle bastante atrativo foi descoberto.

O estímulo da germinação das sementes de *S. asiatica* na ausência do hospedeiro é letal para esta planta parasita, uma vez que o ataque às raízes da planta hospedeira é fundamental para sua sobrevivência. Aquelas plântulas deste parasita que conseguiram sobreviver foram satisfatoriamente controladas por métodos químicos convencionais (Joel et al., 1995). Os métodos de aplicação de etileno no solo foram desenvolvidos pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) e mais de 6.000 hectares de campos infestados com *S. asiatica* são tratados anualmente. Testes realizados posteriormente indicaram que as populações de sementes de *S. asiatica* no solo foram reduzidas em mais de 90% nos campos tratados com etileno.

Os resultados indicam que o problema da dormência em bancos de sementes no solo pode ser significativamente reduzido com trabalhos desta natureza. Obviamente que as consequências decorrentes dos mecanismos de dormência das sementes não serão completamente solucionadas, pelo fato destes mecanismos serem um meio biológico de sobrevivência bem estabelecido pelas plantas daninhas, ao longo de muitos séculos de seleção natural. Entretanto, com um melhor entendimento dos mecanismos que controlam a dormência e o processo de germinação das sementes de inúmeras espécies de invasoras, certamente serão desenvolvidas novas tecnologias e tratamentos adequados para equacionar ou, pelos menos, reduzir significativamente o impacto da competição de plantas daninhas sobre as culturas.

Referências

- Amen, R.D., A model of seed dormancy. *Bot Rev*, 34:1–25, 1968.
- Baskin, J.M. & Baskin, C.C., The annual dormancy cycle in buried weed seeds: a continuum. *Bioscience*, 25:492–498, 1985.
- Baskin, J.M. & Baskin, C.C., Physiology of dormancy and germination in relation to seed bank ecology. In: Baskin, J.M. & Baskin, C.C., (Eds.). *Ecology and Soil Seed Banks*. San Diego, EUA: Academic Press, 1989. p. 53–66.
- Bazzaz, F.A., Plant-plant interactions in successional environments. In: Grace, J.B. & Tilman, D., (Eds.). *Perspectives on Plant Competition*. San Diego, EUA: Academic Press, 1990. p. 239–263.
- Benoit, D.L.; Derksen, D.A. & Panneton, B., Innovative approaches to seedbank studies. *Weed Sci*, 40:660–669, 1992.
- Benoit, D.L.; Kenkel, N.C. & Cavers, P.B., Factors influencing the precision of soil seed bank estimates. *Can J Bot*, 67:2833–2840, 1989.
- Bewley, J.D. & Black, M., Dormancy and the control of germination. In: Bewley, J.D. & Black, M., (Eds.). *Seeds: Physiology of Development and Germination*. New York, EUA: Plenum Press, 1994. p. 199–271.
- Brasil, , *Regras para Análise de Sementes*. Brasília, DF: Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, 2009. 399 p.
- Buhler, D.D.; Hartzler, R.G. & Forcella, F., Weed seed bank dynamics: implications to weed management. In: Basra, A.S., (Ed.). *Crop Sciences: Recent Advances*. New York, EUA: The Haworth Press, 1998. p. 145–168.
- Burnside, O.C.; Noomaw, R.S.; Roeth, F.W.; Wicks, G.A. & Wilson, R.G., Weed seed demise in soil in weed-free corn (*Zea mays*) production across Nebraska. *Weed Sci*, 34:248–251, 1986.
- Carvalho, N.M. & Nakagawa, J., (Eds.), *Sementes: Ciência, Tecnologia e Produção*. 4a edição. Jaboticabal, SP: FUNEP, 2000. 588 p.
- Cavers, P.B., Seed demography. *Can J Bot*, 61:3678–3690, 1983.
- Cavers, P.B., Seed banks: memory in soil. *Can J Soil Sci*, 75:11–13, 1995.
- Cicero, S.M., Dormência de sementes. In: Cicero, S.M.; Mascos-Filho, J. & Silva, W.R., (Eds.). *Atualização em Produção de Sementes*. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1986. p. 41–73.
- Copeland, L.O. & McDonald, M.B., Seed dormancy. In: Copeland, L.O. & McDonald, M.B., (Eds.). *Principles of Seed Science and Technology*. New York, EUA: Macmillan Publishing Company, 1985. p. 103–120.
- Crocker, W. & Barton, L.V., *Physiology of Seeds*. Waltham, EUA: Chronica Botanica Company, 1957. 267 p.
- Darlington, H.T. & Steinbauer, G.P., The eighty-year period for Dr. Beal's seed viability experiment. *Am J Bot*, 48:321–328, 1961.

- Dawson, J.H. & Bruns, V.F., Longevity of barnyard grass, green foxtail and yellow foxtail seeds in soil. *Weed Sci*, 23:437-440, 1975.
- Duke, S.H. & Kakefuda, G., Role of the testa in preventing cellular rupture during imbibition of legume seeds. *Plant Physiol*, 67:447-450, 1981.
- Egley, G.H., Seed germination in soil: dormancy cycles. In: Kigel, J. & Galili, G., (Eds.). *Seed Development and Germination*. New York, EUA: Marcel Dekker, Inc., 1995. p. 529-543.
- Egley, G.H. & Chandler, J.M., Longevity of weed seeds after 5.5 years in the Stoneville 50-year buried seed study. *Weed Sci*, 31:264-270, 1983.
- Egley, G.H. & Duke, S.O., Physiology of weed seed dormancy and germination. In: Duke, S.O., (Ed.). *Weed Physiology - Reproduction and Ecophysiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. 1, 1985. p. 27-64.
- Eplee, R.E., Ethylene: a witchweed seed germination stimulant. *Weed Sci*, 23:433-436, 1975.
- Fenner, M., *Seed ecology*. London, UK: Chapman and Hall, 1985. 485 p.
- Fenner, M., Ecology of seed banks. In: Kigel, J. & Galili, G., (Eds.). *Seed Development and Germination*. New York, EUA: Marcel Dekker, Inc., 1995. p. 507-528.
- Harper, J.L., *Population Biology of Plants*. London, UK: Academic Press, 1977. 892 p.
- Joel, D.M.; Steffens, J.C. & Matthews, D.E., Germination of weedy root parasites. In: Kigel, J. & Galili, G., (Eds.). *Seed Development and Germination*. New York, EUA: Marcel Dekker, Inc., 1995. p. 567-597.
- Khan, A.A., Cytokinins: permissive role in seed germination. *Science*, 171:853-859, 1971.
- Khan, A.A., *The Physiology and Biochemistry of Seed Dormancy and Germination*. 2a edição. Amsterdam: Elsevier/North Holland, 1980. 447 p.
- Klingman, G.C.; Ashton, F.M. & Noordhoff, L.J., Biology of weeds and weed seeds. In: Klingman, G.C.; Ashton, F.M. & Noordhoff, L.J., (Eds.). *Weed Science: Principles and Practices*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1982. p. 37-57.
- Leck, M.A.; Parker, V.T. & Simpson, R.L., *Ecology of soil seed banks*. London, UK: Academic Press, 1989. 524 p.
- Lewis, J., Longevity of crop and weed seeds: survival after 20 years in soil. *Weed Res*, 13:179-191, 1973.
- Marcos Filho, J., *Fisiologia de Sementes de Plantas Cultivadas*. Piracicaba, SP: FEALQ, 2005. 495 p.

- Mayer, A.M. & Poljakoff-Mayber, A., Dormancy, germination inhibition and stimulation. In: Mayer, A.M. & Poljakoff-Mayber, A., (Eds.). *The Germination of Seeds*. Oxford, UK: Pergamon Press, 1989. p. 71–110.
- Murdoch, A.J. & Ellis, R.H., Longevity, viability and dormancy. In: Fenner, M., (Ed.). *Seeds: the Ecology of Regeneration in Plant Communities*. Wallingford, EUA: CAB International, 1992. p. 193–229.
- Olatoye, S.T. & Hall, M.A., Interaction of ethylene and light on dormant weed seeds. In: Heydecker, W., (Ed.). *Seed Ecology*. Norwich, EUA: The Pennsylvania State University Press, 1972. p. 233–249.
- Popinigis, F., *Fisiologia da Semente*. 2a edição. Brasília, DF: AGIPLAN, 1985. 289 p.
- Radosevich, S.; Holt, J. & Ghera, C., Weed demography and population dynamics. In: Radosevich, S.; Holt, J. & Ghera, C., (Eds.). *Weed Ecology: Implications for Management*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1996. p. 103–162.
- Roberts, E.H., Oxidative processes and the control of seed germination. In: Heydecker, W., (Ed.). *Seed Ecology*. Norwich, EUA: Pennsylvania State University Press, 2a edição, 1973. p. 189–218.
- Roberts, E.H., Dormancy: a factor affecting seed survival in the soil. In: Roberts, E.H., (Ed.). *Viability of Seeds*. London, UK: Chapman and Hall, 1974. p. 321–359.
- Roberts, H.A., Weed seeds in horticultural soils. *Sci Hort*, 34:1–11, 1983.
- Roberts, H.A. & Dawkins, P.A., Effect of cultivation on the numbers of viable weed seeds in soil. *Weed Res*, 7:290–301, 1967.
- Roberts, H.A. & Feast, P.M., Emergence and longevity of seeds of annual weeds in cultivated and undisturbed soil. *J Appl Ecol*, 10:133–143, 1973.
- Roberts, H.A. & Neilson, J.E., Changes in the soil seed bank of four long term crop herbicide experiments. *J Appl Ecol*, 18:661–668, 1981.
- Roberts, H.A. & Ricketts, M.E., Quantitative relationships between the weed flora after cultivation and the seed population in the soil. *Weed Res*, 19:269–275, 1979.
- Schafer, D.E. & Chilcote, D.P., Factors influencing persistence and depletion in buried seed populations. II. The effects of soil temperature and moisture. *Crop Sci*, 10:342–345, 1970.
- Schonbeck, M.W. & Egley, G.H., Changes in sensitivity of *Amaranthus retroflexus* L. seeds to ethylene during preincubation I. Constant temperatures. *Plant Cell Environ*, 4:229–236, 1981.
- Schweizer, E.E. & Zimdahl, R.L., Weed seed decline in irrigated soil after six years of continuous corn (*Zea mays*) and herbicides. *Weed Sci*, 32:76–83, 1984.

- Standifer, L.C., A technique for estimating weed seed populations in cultivated soil. *Weed Sci*, 28:134–138, 1980.
- Taylorson, R.B., Environmental and chemical manipulation of weed seed dormancy. *Rev Weed Sci*, 3:135–154, 1987.
- Thomas, T.H., Cytokinins, cytokinin-active compounds and seed germination. In: Khan, A.A., (Ed.). *The Physiology and Biochemistry of Seed Dormancy and Germination*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier/North Holland, 2a edição, 1980. p. 111–144.
- Thompson, K. & Grime, J.P., Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *J Ecol*, 67:893–921, 1979.
- Toole, E.H., Final results of the Duvel buried seed experiment. *J Agric Res*, 72:201–210, 1946.
- Vidaver, W., Light and seed germination. In: Khan, A.A., (Ed.). *The Physiology and Biochemistry of Seed Dormancy and Germination*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier/North Holland, 2a edição, 1977. p. 181–198.
- Villiers, T.A., Seed dormancy. In: Kozłowski, T.T., (Ed.). *Seed Biology*. New York, EUA: Academic Press, v. 2, 1972. p. 219–281.
- Villiers, T.A., Seed aging: chromosome stability and extended viability of seeds stored fully imbibed. *Plant Physiol*, 53:875–878, 1974.
- Villiers, T.A. & Edgecumbe, D.J., On the cause of seed deterioration in dry storage. *Seed Sci Technol*, 3:761–774, 1975.
- Voll, E.; Domit, L.A.; Gazziero, D.L.P.; Rodrigues, B.N.; Adegas, F.S.; Costa, J.M.; Wobeto, C. & Vicente, D., *Levantamento de Banco de Sementes e de Flora Daninha Emergente no Manejo Integrado de Plantas Daninhas, em Lavouras de Soja no Paraná – 95/96*. Londrina, PR: Embrapa Soja, 1997. 6 p.
- Wilson, R.G., Biology of weed seeds in soil. In: Altieri, M. & Liebman, M., (Eds.). *Weed Management in Agroecosystems: Ecological Approaches*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1988. p. 25–39.
- Wilson, R.G.; Kerr, E.D. & Nelson, L.A., Potential for using weed seed content in the soil to predict future weed problems. *Weed Sci*, 33:171–175, 1985.
- Zimdahl, R.L., Weed biology: reproduction and dispersal. In: Zimdahl, R.L., (Ed.). *Fundamentals of Weed Science*. San Diego, EUA: Academic Press, 1993. p. 59–89.

Métodos de Manejo

Jamil Constantin

1. Introdução

Ao analisar a história da agricultura, observa-se que há bem pouco tempo o homem dispõe de produtos químicos realmente eficientes para o controle de plantas daninhas e que, na maior parte da existência humana, o combate às invasoras foi realizado por meio de uma série de técnicas que se mostraram suficientes para manter um nível de produção adequado às necessidades requeridas.

Com o aumento da população mundial, houve necessidade de desenvolvimento de novas formas de produção; dentre estas surgiram os herbicidas, que, com sua eficiência, facilitaram muito o controle das plantas daninhas. Mas, independente do desempenho destes produtos, nota-se que as invasoras não desapareceram. Algumas espécies diminuíram sensivelmente, ao passo que outras aumentaram, ou seja, o uso de herbicidas propiciou o desenvolvimento de uma flora altamente competitiva, sendo que atualmente começam a surgir, inclusive, infestantes resistentes a alguns destes produtos. Isto não quer dizer que os herbicidas não sejam uma tecnologia viável, pelo contrário, constituem uma importante arma a ser utilizada. No entanto, o seu uso isolado pode trazer um bom resultado no curto prazo, mas em médio e longo prazo os problemas podem surgir. É necessário, desta forma, a integração com outras formas de manejo para que o controle químico seja mais efetivo e utilizável por um longo período de tempo.

Constata-se que os herbicidas não são a solução final para as plantas daninhas e que os demais métodos de manejo possuem uma eficiência que deve ser resgatada e utilizada. Desta forma, a diversificação dos métodos de controle utilizados em uma cultura implica em maior eficiência e, também, em maior economia.

Segundo [Deuber \(1992\)](#) a combinação de diferentes métodos, denominada manejo integrado, tem como metas o controle mais eficaz, aproveitamento de recursos disponíveis, redução de custos, maximização de segurança ao homem e minimização da contaminação do meio, associando-os ao combate de pragas e doenças e ao controle de erosão. É, portanto, indispensável a integração dos métodos de controle em um programa de manejo

de plantas daninhas e, ainda, o programa de manejo deverá se adequar às diferentes situações encontradas em nível de campo, não sendo um sistema estanque. Para Pitelli (1990), a meta primária de qualquer sistema de manejo de plantas daninhas é a manutenção de um ambiente o mais inóspito possível ao mato, por meio do emprego específico ou combinado de métodos biológicos, culturais, mecânicos e químicos.

O mais importante componente no manejo das infestantes é a própria cultura, ou seja, a cultura é o principal método de controle das plantas daninhas. Uma cultura bem implantada, sadia e vigorosa possui um alto poder de competição, dificultando sobremaneira o surgimento e o desenvolvimento das invasoras, visto que estas têm dificuldade em se instalar e competir em culturas que já estejam ocupando um determinado ambiente. Assim, os métodos de manejo visam apenas propiciar uma vantagem para a cultura no início do seu desenvolvimento, pois após esta fase inicial a própria cultura é capaz de controlar o mato por si só, principalmente através do sombreamento, ganhando o processo competitivo e reduzindo o potencial reprodutivo das plantas daninhas.

Conclui-se, então, que a integração dos métodos é primordial e que a cultura é decisiva no funcionamento destes métodos e, ainda, que um sistema de manejo deve visar não somente a eliminação da interferência das plantas daninhas sobre a produção da cultura implantada mas deve, também, visar à diminuição da produção de propágulos para que haja uma redução gradativa nas infestações sobre as futuras explorações agrícolas.

Por uma questão didática, dividiu-se em tópicos a discussão referente aos diferentes tipos de controle. No entanto, como já discutido, eles podem e devem ser utilizados de maneira conjunta. Assim, as categorias de controle que podem ser utilizadas em um sistema de manejo de plantas daninhas são: erradicação, prevenção e controle propriamente dito.

2. Erradicação

Neste método a planta daninha é totalmente eliminada da área, destruindo-se as suas sementes ou qualquer outra forma de propagação como tubérculos, rizomas e bulbos. A infestante não ocorre mais na área a não ser que seja introduzida novamente.

São utilizados, normalmente, produtos químicos como o brometo de metila, que promovem a desinfecção do solo e eliminam todos os propágulos das plantas daninhas. Devido à dificuldade e ao custo do processo, normalmente este só é utilizado em pequenas áreas como estufas e hortas, sendo muito utilizado no tratamento de substratos para a produção de mudas em viveiros. Garante-se desta forma que, nestas áreas tratadas, não ocorra a presença de plantas daninhas, principalmente aquelas consideradas extremamente problemáticas e de difícil controle, como a tiririca (*Cyperus rotundus*).

3. Prevenção

Relaciona-se a métodos que impeçam a introdução e a disseminação de plantas daninhas em áreas onde elas não existam ou a partir de um foco inicial dentro da propriedade agrícola. Mesmo que já exista uma determinada espécie de planta daninha dentro de uma área, deve-se utilizar medidas preventivas para impedir a entrada de novos propágulos e, com isto, reduzir o potencial de infestação. Também, deve-se isolar focos iniciais de novas plantas daninhas que porventura ocorram na área explorada, evitando o seu alastramento pela propriedade. A prevenção é, sem dúvida, uma importante forma de manejo, pois quando é possível evitar a introdução da planta daninha em uma determinada área, evita-se prejuízos e custos com o seu controle. Além disto, normalmente as medidas preventivas não demandam custos elevados e são de fácil execução, sendo que o retorno destas medidas é sempre elevado em médio e longo prazos.

É importante ter em mente que o homem é o principal agente de disseminação de plantas daninhas e que as sementes das culturas são um dos principais meios de introdução e disseminação das sementes de plantas daninhas. Por isto, deve-se utilizar sementes produzidas por produtores idôneos e que estejam isentas de propágulos das infestantes, sendo o uso de sementes certificadas a melhor opção. Com relação à aquisição de mudas, deve-se adotar os mesmos cuidados citados anteriormente para a aquisição de sementes, para que no futuro os problemas não prejudiquem ou até mesmo inviabilizem a exploração agrícola. Já é previsto na legislação pertinente normas para a produção e comercialização de sementes e mudas, onde é limitada ou proibida a presença de propágulos de certas plantas daninhas, mas a mesma encontra-se muitas vezes defasada, por isto, está em análise no Congresso uma nova norma para produção de sementes e mudas, devendo o técnico utilizar de bom senso com relação às espécies de ocorrência recente e às mais nocivas. É imprescindível dispor de um certificado ou atestado de garantia da qualidade do lote ou, ainda, uma análise que mostre quais espécies de infestantes estão presentes e sua quantidade, para que o técnico possa optar pelo melhor lote de sementes ou mudas a ser adquirido. Em resumo, as principais resoluções da Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Paraná (SEAB) que normalizam a legislação atual para produção e comercialização de sementes e mudas no Estado do Paraná são as seguintes: 003/86, 051/86, 127/87, 091/96, 156/96, 093/98, 125/98, 126/98, 167/98, 027/99, 028/99, as quais devem ser consultadas em casos de dúvidas.

A limpeza de máquinas, equipamentos, pessoas e animais que vão entrar em uma área é uma importante medida preventiva, pois todos estes agentes podem trazer consigo propágulos de plantas daninhas. Observa-se muitas vezes que máquinas e equipamentos, utilizados em áreas infestadas, não passam por nenhum processo de limpeza antes de irem para outra

parte da propriedade ou para outras regiões, causando, assim, a disseminação de plantas daninhas. O tempo não utilizado na limpeza do maquinário irá resultar, no futuro, em um tempo e custos ainda maiores do que para o controle, pois serão introduzidas grandes quantidades de propágulos de plantas daninhas onde antes eles não existiam. Pessoas podem transportar disseminulos em suas roupas e sapatos, assim como animais podem transportá-los em seu corpo, devendo também passar por um processo de limpeza para não serem agentes de disseminação.

Áreas vizinhas sem culturas, curvas de nível, estradas e carreadores devem passar por um processo constante de monitoramento para que sejam eliminadas as plantas daninhas que nelas por ventura venham a surgir, antes que os disseminulos venham a ser produzidos e se tornem uma fonte de contaminação das demais áreas.

As represas, rios e canais de captação de água devem ter as suas margens isentas de plantas daninhas que produzam disseminulos que possam ser transportados com a água, pois, caso se faça uma irrigação, esta pode disseminar as sementes das infestantes por toda a área.

A adubação orgânica deve receber especial atenção, visto que é necessário que o material esteja completamente fermentado para que a maior parte dos propágulos perca sua viabilidade, pela ação da temperatura e de microorganismos. A passagem de sementes de plantas daninhas pelo trato intestinal dos animais não garante que estas percam sua viabilidade, por isto, animais recém-adquiridos devem passar por um período mínimo de confinamento de sete dias, para que todo material ingerido em outras regiões seja digerido e expelido em uma área de fácil controle, evitando que novas plantas daninhas entrem na propriedade.

Há ainda o fato de que determinadas sementes de plantas daninhas podem ser transportadas pelo vento. O uso de quebra-ventos pode ser uma barreira a este tipo de propagação, retendo boa parte destas sementes. Neste caso, mesmo que ocorra a introdução de uma espécie daninha, a dispersão dela acaba limitada pelo quebra-vento, o que, posteriormente, pode facilitar o controle, uma vez que a emergência ocorre em uma área mais restrita.

4. Controle Propriamente Dito

Refere-se basicamente à utilização de medidas diretas que tem como objetivo reduzir suficientemente o número ou o desenvolvimento das plantas daninhas a fim de impedir que a interferência sobre as plantas cultivadas afete a produção econômica. Tais medidas servem também para prevenir o aumento no número de propágulos para as explorações futuras.

4.1 Medidas físicas

- **Calor:** provoca a coagulação do protoplasma em células das folhas e do caule. O ponto térmico letal para a maioria das células vegetais é entre 45 e 55°C, sendo as sementes mais tolerantes. Na planta atingida pelo fogo também morre a parte superior do sistema radicular, devido à translocação de subprodutos tóxicos resultantes da termodegradação de componentes da parte aérea. O fogo destrói uma população existente mas não é eficiente para prevenir a instalação de novas populações podendo, inclusive, promover a quebra de dormência de uma série de sementes de plantas daninhas. A utilização de queimadas é o principal meio de controle pelo fogo, mas, devido aos seus efeitos nocivos sobre o solo, ambiente e eliminação de animais só em ocasiões muito particulares poderia ser recomendada.
- **Vapor:** é outra forma de utilização do calor. É possível utilizar caixas onde se insufla o vapor de água, o qual, pela sua elevada temperatura, promove a esterilização do solo que aí esteja contido, sendo uma opção ao uso de produtos químicos para desinfecção de substratos para canteiros e produção de mudas. Também pode-se utilizar o vapor diretamente no solo com máquinas especiais, em pequenas áreas, para o controle de plantas daninhas.
- **Água:** tanto a inundação como a drenagem podem ser utilizadas no controle das plantas daninhas. Grande número de plantas daninhas não sobrevive quando uma área é inundada, lembrando que a lâmina de água deve submergir totalmente as plantas para que o processo seja eficiente. O exemplo mais típico de utilização da água no manejo de invasoras ocorre na cultura do arroz pré-germinado. O arroz-vermelho é uma das mais importantes infestantes do arroz irrigado, contudo, ao manter o solo saturado por água a germinação desta espécie é sensivelmente diminuída, sem que haja prejuízo para o arroz pré-germinado consegue se desenvolver normalmente nestas condições. O contrário também pode ser utilizado, ou seja, em áreas inundadas onde a presença de plantas daninhas adaptadas a estas condições se tornou um problema, pode-se fazer a drenagem, caso seja possível, que é com certeza um método extremamente eficiente no controle destas plantas daninhas.

Um novo método físico está em estudos para a sua viabilização, que é a utilização de choque elétrico para o controle de plantas daninhas. Ainda há problemas para se desenvolver o equipamento mais adequado para a utilização em nível de campo, utilização de maneira seletiva nas culturas e, ainda, o método não apresenta efeito residual. No entanto, com pesquisas mais apuradas, esta modalidade de controle poderá ser uma interessante alternativa no manejo das invasoras, em determinadas áreas, pois se aliará eficiência a um baixo custo no longo prazo.

4.2 Medidas culturais

Trata-se do uso de práticas culturais ou agrícolas que podem tanto ajudar na eliminação de plantas daninhas quanto aumentar o potencial competitivo da cultura, que por sua vez irá contribuir no controle das plantas daninhas. Reitera-se aqui a importância da cultura em um sistema de manejo; qualquer prática que incremente o desenvolvimento e o poder de competição da cultura diminuirá substancialmente a interferência das plantas daninhas e, também, aumentará a eficiência dos diferentes métodos de controle utilizados. Entre outras, destacam-se as seguintes medidas de controle cultural:

- **Manejo de plantas daninhas na entressafra:** o controle das plantas daninhas não pode se restringir apenas ao período em que as culturas estão implantadas, mas deve também ser realizado no intervalo entre cultivos. Impedindo-se que aquelas plantas daninhas que surgem na entressafra produzam propágulos, garante-se um menor nível de infestação quando do próximo plantio das culturas, e com isto a interferência será menor e o controle posterior facilitado. Em áreas de plantio direto, quanto mais as plantas daninhas crescem na entressafra, mais difícil se torna o manejo destas antes do plantio seguinte, sendo que em menores proporções isto também ocorre no plantio convencional.
- **Rotação de culturas:** visa modificar a população de plantas daninhas predominantes e propicia diversificação nos métodos de controle. Quando culturas diferentes são exploradas em uma mesma área, modifica-se a intensidade de competição e os efeitos alelopáticos a que as plantas daninhas estão submetidas. Abre-se, também, uma oportunidade de utilização de herbicidas com mecanismos de ação diferenciados, ou seja, pode-se fazer uma rotação também de herbicidas e de métodos de controle. Esta rotação de sistemas de manejo, propiciada pela rotação de culturas, dificulta muito o surgimento de uma planta daninha que venha a dominar o ambiente e ainda previne a seleção de espécies resistentes a determinados herbicidas. Assim, uma planta daninha problemática para o controle químico na cultura da soja, por exemplo, pode ser facilmente controlada por herbicidas utilizados quando da exploração da cultura do milho, e vice-versa.
- **Escolha de cultivares:** como a cultura é determinante no sucesso do controle de plantas daninhas, as cultivares a serem exploradas devem ser escolhidas segundo alguns critérios. As cultivares que se desenvolvem mais rapidamente e cobrem o solo de maneira mais intensa conseguem controlar melhor as plantas daninhas e sofrem menos com a interferência que eventualmente possa surgir. Portanto,

devem ser eleitas aquelas cultivares mais adaptadas à região e que sejam mais agressivas em seu crescimento.

- **Período de controle:** deve ser efetuado não só visando à interferência das plantas daninhas sobre a produção da cultura, mas, se for necessário, o controle deve-se prolongar até a colheita. O controle até a colheita muitas vezes se justifica nos casos em que, mesmo não ocorrendo perdas na produtividade e qualidade da colheita após determinado período do ciclo, pode ocorrer interferência na operação de colheita ou quando existe a possibilidade de propágulos que possam vir a se tornar problema no futuro.
- **Cobertura morta:** a palha da cultura anterior auxilia no controle das plantas daninhas, através dos efeitos físico e alelopático, e isto normalmente acontece em áreas onde o plantio direto é bem conduzido. Fisicamente, a cobertura atuará sobre a luz, temperatura e umidade, dificultando os processos de quebra de dormência e impedindo a germinação dos propágulos e, também, poderá funcionar como uma barreira mecânica à emergência das plântulas das infestantes anuais. Quimicamente, por meio da alelopatia, a cobertura pode liberar substâncias no meio que impeçam ou diminuam a germinação e o desenvolvimento das plantas daninhas. A cobertura morta deve ser escolhida, sempre que possível, de acordo com as plantas daninhas presentes nas áreas, pois conforme a origem da cobertura, ela será mais efetiva sobre uma ou outra espécie de planta daninha.
- **Adubação verde:** pode ser usada em áreas que estão em pousio ou intercalada em culturas semi-perenes ou perenes. Dentre os diversos benefícios da cobertura verde encontram-se o controle de plantas daninhas, pois o solo é mantido ocupado, dificultando a instalação das infestantes, evitar erosão, reciclagem de nutrientes, manutenção da umidade, diminuição da temperatura do solo e podem ser uma fonte de renda. O adubo verde pode ser manejado, mecânica e/ou quimicamente, vindo a se tornar uma cobertura morta de modo a auxiliar no controle das plantas daninhas. Deve-se ter cuidado na utilização de cobertura verde de forma intercalar em outras culturas, pois a competição e a alelopatia podem trazer prejuízos que podem suplantam os benefícios que possam advir com esta prática, devendo a decisão ser tomada com base em sistemas de consórcio com sucesso devidamente comprovado.
- **Espaçamento e densidade de plantio:** quanto menor o espaçamento entre as linhas de plantio e maior a densidade de plantas da cultura numa mesma linha, mais precoce e efetivo é o fechamento da cultura, e com isto mais eficiente é o controle das plantas daninhas. No entanto, isto tem um limite, que é o número máximo de plantas

por unidade de área recomendado pela pesquisa para cada cultura. Ao extrapolar este limite haverá concorrência entre as plantas da própria cultura. Assim, pensando no controle de plantas daninhas, deve-se trabalhar no limite superior de número de plantas por área recomendado pela pesquisa para cada cultura e região.

- **Preparo do solo:** o preparo do solo por meio de arações e gradagens é um método eficiente de controle das plantas daninhas antes do plantio, pois promove a destruição e o enterrio das invasoras. Desta forma pode-se preparar o solo com antecedência e efetuar uma última gradagem leve antes do plantio, visando controlar a sementeira que houver emergido, o que resultaria na diminuição da infestação na cultura e evitaria trazer mais sementes viáveis para a superfície do solo. Pode-se utilizar a movimentação do solo, nas entressafras, para forçar a emergência das plantas daninhas e posteriormente promover seu controle, reduzindo o banco de sementes do solo. No entanto, tal medida deve ser criteriosamente avaliada antes de sua utilização, pois pode ocasionar efeitos de desestruturação, compactação e erosão pela excessiva movimentação do solo.
- **Época de plantio:** a realização do plantio na época mais adequada implica em condições ótimas de temperatura, luz e precipitação para o desenvolvimento da cultura. Consequentemente, resulta em uma lavoura que fechará mais rapidamente e controlará melhor as plantas daninhas.
- **Adubação e correção do solo:** cultura nutrida adequadamente cobre o solo rapidamente, sendo que a adubação localizada na linha de plantio favorece mais a cultura do que a planta daninha. A correção do solo pode eliminar plantas daninhas mais adaptadas à condição de solos ácidos como a samambaia (*Pteridium aquilinum*) e o capim-favorito (*Rhynchelytrum repens*).
- **Controle de pragas e doenças:** o poder competitivo de uma cultura depende de sua sanidade. Por isto, em lavouras onde as pragas e doenças são devidamente controladas, as plantas daninhas têm maior dificuldade para o seu estabelecimento e desenvolvimento.

4.3 Medidas biológicas

Relaciona-se ao uso de inimigos naturais das plantas daninhas como insetos, fungos, bactérias, ácaros e animais que predam ou parasitam as invasoras. Este assunto é convenientemente abordado em capítulo específico deste livro, onde são descritos os pontos cruciais para o sucesso deste tipo de controle.

4.4 Medidas mecânicas

- **Controle manual:** é feito por meio de arranquio manual das plantas daninhas. É um método muito eficiente sendo, no entanto, caro, lento e de difícil execução. Pode ser utilizado em áreas pequenas ou com baixa infestação. A sua utilização em grandes áreas é possível, principalmente para plantas problemáticas, quando a dispersão e a frequência da planta daninha ainda são pequenas. Desta forma o rendimento desta prática é elevado e evita-se que esta nova planta daninha venha a ser um problema sério no futuro.
- **Capina manual:** é realizada com a utilização de enxadas. O uso de enxadas é viável para lavouras pequenas, contudo, havendo disponibilidade de recursos humanos, não deve ser descartado para utilização em áreas maiores. É um método normalmente de baixo rendimento e de custo elevado, mas, se utilizado na operação de catação ou repasse, pode ser realizado com bastante eficiência e, por vezes, constitui a forma mais econômica de manejo mesmo em grandes áreas, especialmente para as plantas daninhas que estão surgindo pela primeira vez na área cultivada ou que escaparam após a utilização de outros métodos de controle. É um método que pode perfeitamente ser utilizado no sistema de plantio direto sem causar maiores problemas. A capina é importante nas bordas da lavoura, que propiciam às plantas daninhas maiores possibilidades de desenvolvimento, devido à livre incidência de luz lateral. Um homem gasta em média oito a doze dias para capinar um hectare.
- **Cultivo mecanizado com tração animal ou trator:** em áreas de pequena a média extensão ou com declive acentuado pode-se utilizar animais para tracionar os implementos, sendo que em áreas maiores normalmente é utilizado o trator. Em função de ser um método que revolve o solo, só é recomendado para áreas de plantio convencional. O cultivo mecânico é largamente utilizado nas culturas por apresentar as vantagens de economia (um dos métodos mais baratos), eficiência e rapidez, principalmente em grandes áreas e em condições de solo seco. As desvantagens incluem a não eliminação das plantas daninhas que estão nas linhas de plantio, eventuais danos causados às raízes mais superficiais da cultura, a dispersão de propágulos para áreas não infestadas, exposição do solo à erosão e, ainda, a formação de camadas adensadas no solo. Para pequenas áreas é comum executar-se este método, por ser econômico e eficiente. Implementos de tração animal ou tratorizada podem ser usados com sucesso, tanto para controlar plantas daninhas anuais como bianuais e até mesmo perenes, mediante o uso de arados, grades e cultivadores. São diversos os tipos de cultivadores existentes no mercado, podendo ser classificados em: a) enxada fixa arrastada

no solo por tração; b) enxada rotativa acionada pela tomada de força do trator; c) enxada rotativa de arrasto movida pela resistência oferecida pelo terreno ao deslocamento. As espécies daninhas anuais são facilmente controladas por este tipo de equipamento, desde que o cultivo seja realizado em condições de solo seco. Em condições de solo úmido, ou se ocorrerem chuvas logo após o cultivo, as raízes podem restabelecer-se rapidamente, inutilizando a operação. No caso do arranquio de plantas anuais ou perenes, provenientes de sementes, os cultivos mecânicos visam desalojá-las de seu contato íntimo com o solo e provocar a morte das mesmas, ou retardar o seu crescimento inicial, favorecendo a cultura na ocupação do meio. Por isto, o cultivo deve ser realizado com as plantas daninhas bem pequenas, máximo de 10 cm de altura. Estas são mais sensíveis e fáceis de serem arrancadas podendo-se trabalhar com o cultivador o mais superficial possível, o que é desejável, pois diminui-se muito as injúrias sobre o sistema radicular da cultura e, também, evita-se trazer sementes de plantas daninhas das camadas mais profundas para a superfície do solo, o que causaria uma nova infestação. O rendimento médio do cultivo à tração animal é de meio a um homem/dia por hectare e a tração mecanizada tem um rendimento de 1,5 a 2,0 horas por hectare.

4.5 Medidas químicas

Consiste na utilização de produtos químicos denominados herbicidas, que, aplicados às plantas, interferem em seus processos bioquímicos e fisiológicos, podendo matar ou retardar significativamente o crescimento destas.

Podem ser utilizados herbicidas seletivos ou não à cultura e que podem ser aplicados no manejo antes do plantio, em pré-plantio e incorporado (PPI), em pré-emergência (PRÉ) da cultura e plantas daninhas e em pós-emergência (PÓS) da cultura e das plantas daninhas.

4.6 Integração dos métodos de controle

Como enfatizado no início deste capítulo, muitas vezes a utilização de um único método de controle não é suficiente para resolver o problema de infestação de plantas daninhas. Assim, a integração dos métodos na maioria das vezes é mais eficiente e econômica. O manejo integrado implica na integração de todas as práticas culturais, visando reduzir custos e, ao mesmo tempo, obter controle eficiente das plantas daninhas. Por isto, o produtor deve lançar mão de todos os recursos que possui e combinar as práticas disponíveis.

Pode-se integrar diversas modalidades de aplicação de herbicidas (PRÉ, PÓS e PPI) com métodos mecânicos, biológicos, físicos e culturais. Uma das combinações de métodos mais comum para a cultura de milho, por exemplo, é a aplicação de um herbicida em pré-emergência na linha, em

uma faixa de 30 a 50 cm, e a utilização de cultivadores nas entrelinhas, sendo este método também bastante comum em culturas perenes tais como as frutíferas. No cultivo de arroz pré-germinado, há utilização conjunta do manejo da água e aplicação de herbicidas. O controle de plantas daninhas perenes, provenientes de órgãos de reprodução vegetativa, se faz muito mais eficiente quando se alternam métodos químicos e mecânicos, o que provoca um esgotamento mais rápido das reservas da planta (Melhorança et al., 1997).

Em síntese, não existe o melhor método de controle mas, sim, o mais adequado para uma determinada situação e momento.

Referências

- Deuber, R., *Ciência das Plantas Daninhas: Fundamentos*. v. 1. Jaboticabal, SP: FUNEP, 1992. 431 p.
- Melhorança, A.L.; Constantin, J. & Pereira, F.A.R., Plantas daninhas. In: *Milho: Informações Técnicas - Circular Técnica*. Dourados, MS: EMBRAPA - Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste, v. 5, 1997. p. 112-132.
- Pitelli, R.A., Biologia de plantas daninhas. In: *Anais da 10ª Semana de Controle de Plantas Daninhas*. Bandeirantes, PR: Fundação Faculdade de Agronomia "Luiz Meneghel", 1990. p. 58-100.

Controle Biológico: Aplicações na Área de Ciência das Plantas Daninhas

Dauri J. Tessmann

1. Introdução

A supressão ou estabilização de populações de plantas daninhas por meio do controle biológico baseia-se na utilização de determinados organismos que dependem destas plantas para a sua sobrevivência. Os grupos de organismos mais estudados e utilizados como agentes de biocontrole são, principalmente, insetos fitófagos e fungos fitopatogênicos, e, em menor escala, bactérias e vírus fitopatogênicos, ácaros e peixes. O objetivo do controle biológico não é a erradicação de populações inteiras de plantas que ocorrem em determinadas áreas, mas sim a redução da sua densidade a níveis aceitáveis ou subeconômicos. Entretanto, o controle biológico possui algumas limitações e não tem sido possível implementá-lo com sucesso em todas as situações em que o controle de plantas daninhas é necessário. Este método tem sido mais utilizado quando ocorre uma grande densidade ou predominância de uma espécie de planta daninha em uma determinada área ou região. Isto porque o controle biológico é muito seletivo, ou seja, os organismos utilizados como agentes de biocontrole são geralmente específicos para determinadas espécies de plantas e, portanto, não atuam contra um complexo florístico. Entretanto, embora em escala global a importância prática do controle biológico para o controle de plantas daninhas ainda seja secundária, este método de controle tem sido implementado com sucesso e está bem estabelecido em vários países.

Os trabalhos pioneiros de controle biológico de plantas consistiram na introdução de insetos fitófagos exóticos de uma área geográfica para outra com o objetivo de controlar plantas daninhas introduzidas. Além desta estratégia, denominada **inoculativa** ou controle biológico clássico, outras duas estratégias também têm sido implementadas para o controle biológico de plantas daninhas: a estratégia **inundativa**, também denominada estratégia bio-herbicida, e a estratégia **umentativa** (Charudattan, 1988; Tebest, 1996).

2. Estratégia Inoculativa ou Controle Biológico Clássico

O controle biológico clássico ou estratégia inoculativa é aplicável nos casos de plantas daninhas que foram introduzidas em áreas novas e que estejam separadas geograficamente dos seus inimigos naturais nativos. Neste caso, o objetivo do controle biológico não é a imediata redução ou eliminação das plantas daninhas, mas sim a redução e a estabilização em longo prazo da densidade de plantas em determinada área. Para que o sucesso do controle biológico clássico seja contínuo, não pode ocorrer a erradicação completa das espécies invasoras em uma área ou região, mas é necessário que uma pequena quantidade de plantas permaneça para viabilizar a sobrevivência dos inimigos naturais das plantas. Esta estratégia está baseada na idéia de que o controle resulta justamente da pressão constante dos inimigos naturais sobre os seus hospedeiros, pois parte-se do princípio de que tais plantas se tornaram daninhas nos novos ambientes devido, em grande parte, à ausência de pressão dos inimigos naturais nas novas áreas colonizadas.

O sucesso do controle biológico clássico depende da capacidade de auto-perpetuação dos agentes nas áreas em que os mesmos foram introduzidos, assim como da sua capacidade de dispersão natural. Para a implementação do controle biológico clássico, a primeira tarefa realizada é uma pesquisa cuidadosa na região de origem da planta daninha, a fim de identificar-se os seus inimigos naturais. Os organismos buscados são aqueles que tenham coevoluído com as plantas, que sejam específicos para determinadas plantas ou grupo de plantas, e que não possuam hospedeiras alternativas na área onde o inimigo natural vai ser introduzido. Somente a partir de então os organismos selecionados serão liberados nas áreas onde o controle é desejado. Como regra geral, tais liberações seguem exaustivas avaliações relativas ao seu impacto ambiental nos novos ambientes.

A estratégia do controle biológico clássico tem sido empregada com sucesso no controle de plantas daninhas que invadem áreas de pastagens extensivas, reservas florestais e ecossistemas frágeis, como, por exemplo, os ecossistemas aquáticos. Nestas áreas o controle mecânico é, muitas vezes, de difícil execução ou mesmo inviável economicamente e o controle químico, além de ser de também de difícil execução, muitas vezes não é desejável devido às suas óbvias implicações ambientais. Nestes ambientes, o controle químico ou mecânico, quando possíveis, são apenas soluções de curto prazo, pois necessitam ser reaplicados regularmente, ao passo que o controle biológico é uma medida que pode oferecer solução de longo prazo para estes problemas.

Os exemplos mais importantes de controle biológico de plantas daninhas com a estratégia clássica estão listados na Tabela 1. O controle de *Senecio jacobaea* e de *Carduus nutans* nas pradarias dos EUA e do Canadá, assim como o controle das plantas daninhas aquáticas *Eichhornia crassipes*, *Alternanthera philoxeroides* e *Pistia stratioides* no sul dos EUA

são os exemplos mais importantes de utilização de insetos fitófagos no controle biológico clássico (McFadyen, 1998). O exemplo mais importante da utilização de fungos fitopatogênicos foi a introdução da ferrugem *Puccinia chondrillina* do mediterrâneo, onde é nativa, para a América do Norte e a Austrália, com o objetivo de controlar a planta daninha *Chondrilla juncea*. Na Austrália, esta planta invasora de pastagens naturais e de lavouras de trigo tem sido controlada com sucesso pela ação desta ferrugem, porém no oeste americano, o controle tem sido apenas parcial. Outro exemplo é a utilização do fungo *Entyloma compositarum* para o controle de *Ageratina riparia* em áreas de pastagens naturais e de florestas no Hawaii. Esta planta foi introduzida naquele estado americano procedente do México em 1925 como ornamental. Em 1974, cerca de nove meses após a introdução do agente de biocontrole, a sua população foi reduzida em mais de 80%.

A ferrugem *Uromycladium tepperianum*, nativa da Austrália e introduzida na África do Sul para o controle de uma espécie de árvore invasora, *Acacia saligna*, é um outro exemplo de sucesso do emprego do controle biológico clássico. Desde a introdução deste fungo naquele país, em 1987, a densidade de plantas nas áreas infectadas por esta ferrugem já foi reduzida em mais de 80%. Outros exemplos importantes também são as introduções das ferrugens *Phragmidium violaceus* no Chile para o controle de *Rubus constrictus*, uma espécie arbustiva que ocorre em pastagens nativas daquele país, e mais recentemente, de *Phragmidium carduorum* nos EUA, procedente da Turquia, para o controle de *Carduus thoermeri* em áreas de pastagens nativas (Tebeest, 1996; Mortensen, 1998).

Muitas plantas tornam-se daninhas porque foram introduzidas intencionalmente ou acidentalmente em regiões fora das áreas de sua distribuição natural. Um exemplo ilustrativo é o caso do aguapé (*Eichhornia crassipes*). Esta planta aquática é nativa da bacia amazônica e do pantanal mato-grossense e têm sido disseminada pelo homem em várias regiões tropicais e subtropicais do planeta durante os últimos cem anos. Nos locais invadidos, esta planta tem se tornado uma das piores plantas invasoras de ambientes aquáticos, devido, em grande parte, à ausência de seus inimigos naturais. Para o seu controle em alguns estados do sul dos EUA tem-se utilizado uma combinação dos métodos de controle biológico, químico e mecânico. Porém, também neste caso, somente o controle biológico parece ser uma solução do problema a longo prazo, uma vez que o controle químico com herbicidas requer freqüentes reaplicações, e o controle mecânico, além de ser muito dispendioso, também deve ser aplicado continuamente para ser eficiente. Para o controle biológico desta planta, três espécies de insetos, *Neochetina brushii*, *N. eichhorniae* (Coleoptera: Curculionidae) e *Sameodes albiguttalis* (Lepidoptera: Pyralidae), foram introduzidas naquele país durante a década de setenta, procedentes da América do Sul (Center, 1996). Os problemas causados por *E. crassipes* são crescentes e

Tabela 1. Alguns exemplares de controle biológico clássico de plantas daninhas com fungos e insetos. Fonte: adaptado de Adams (1988), Charudattan (1990), Center (1996), Grodowitz et al. (1997), McFadyen (1998) e Mortensen (1998).

Planta Daninha	Local	Agente de controle biológico	Natureza do agente	Origem do agente
<i>Acacia saligna</i>	África do Sul	<i>Uromycladium tepperianum</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Austrália
<i>Ageratina riparia</i>	EUA, Hawai	<i>Entyloma ageratinae</i>	Fungo (Ascomycota)	Jamaica
<i>Alternanthera philoxeroides</i>	EUA	<i>Agasticles hygrophila</i>	Inseto (Coleoptera: Chrysomelidae)	Argentina
<i>Carduus nutans</i>	EUA, Canadá	<i>Rhinozyllus conicus</i>	Inseto (Coleoptera: Curculionidae)	França
<i>C. nutans</i>	EUA, Canadá	<i>Puccinia carduorum*</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Turquia
<i>Chondrilla juncea</i>	Austrália, EUA	<i>Puccinia chondrillina</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Europa
<i>Cirsium arvense</i>	Austrália, EUA	<i>Puccinia xanthi</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Austrália
<i>Eichhornia crassipes</i>	EUA	<i>Neochetna eichhorniae</i>	Inseto (Coleoptera: Curculionidae)	Am. do Sul
<i>E. crassipes</i>	EUA	<i>N. bruchi</i>	Inseto (Coleoptera: Curculionidae)	Am. do Sul
<i>E. crassipes</i>	EUA	<i>Uredo eichhorniae*</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Argentina
<i>Galega officinalis</i>	Chile	<i>Uromyces galega</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	França
<i>Hydrilla verticillata</i>	EUA	<i>Hydrilla balcanasi*</i>	Inseto (Diptera: Ephyrididae)	Austrália
<i>Pistia stratiotes</i>	EUA	<i>Neohydronomus affinis</i>	Inseto (Coleoptera: Curculionidae)	Argentina
<i>Rubus constrictus</i>	Chile	<i>Phragmidium violaceum</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Alemanha
<i>R. fruticosus</i>	Austrália	<i>P. violaceum</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Alemanha
<i>R. ulmifolius</i>	Chile	<i>P. violaceum</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Alemanha
<i>Senecio jacobaeae</i>	EUA	<i>Longiasus jacobaeae</i>	Inseto (Coleoptera: Chrysomelidae)	Itália
<i>S. vulgaris</i>	EUA, Europa	<i>P. lagenophorae</i>	Fungo (Basidiomycota - ferrugem)	Austrália

* em estudo.

atualmente vários países africanos, asiáticos e centro americanos estão implementando programas de controle biológico para esta planta com insetos fitófagos e fungos fitopatogênicos (Charudattan et al., 1996). Também no caso dos ambientes aquáticos, dentre os esforços que têm sido direcionados para o desenvolvimento de opções de controle de plantas daninhas, tem-se incluído, inclusive, a utilização de peixes, como é o caso da carpa (*Ctenopharyngodon idella*), um herbívoro não seletivo utilizado para o controle de plantas aquáticas submersas.

Em linhas gerais a estratégia de controle biológico clássica é eficiente para o controle de plantas daninhas perenes e exóticas que crescem formando estandes densos e que cobrem áreas extensivas. Particularmente, quando a ocorrência de pequenas populações residuais da planta não causa perdas econômicas e quando outras práticas de controle não são economicamente viáveis ou ambientalmente aceitáveis. Esta estratégia é especialmente apropriada para o controle de plantas daninhas exóticas que estão geograficamente isoladas de seus parasitas. Tais plantas quando introduzidas em novas regiões sem seus inimigos naturais frequentemente se disseminam e aumentam sua população tornando-se plantas daninhas.

A agressividade dos organismos utilizados como agentes de controle biológico determina dois efeitos principais sobre as populações de plantas hospedeiras: o aumento na sua mortalidade ou a redução da sua capacidade de reprodução. No caso da estratégia de controle biológico clássica, os organismos reduzem as populações de plantas hospedeiras em função de reduzirem, geralmente, a capacidade de reprodução das plantas. Enquanto que no caso de fitopatógenos empregados na estratégia bio-herbicida, os patógenos, geralmente, causam a mortalidade direta das plantas hospedeiras. Neste sentido, vários trabalhos têm demonstrado que a dinâmica da densidade de plantas hospedeiras ao longo de muitos anos pode ser uma função da agressividade dos organismos que colonizam estas plantas (Tebeest et al., 1992). No caso de fungos fitopatogênicos, o estudo de simulação de Tebeest et al. (1992) mostrou que as alterações na densidade das plantas hospedeiras pode ser influenciada pela agressividade dos patógenos que colonizam as mesmas. A Figura 1 mostra que a introdução de um patógeno com baixa agressividade ($K = 0,15$; onde 0,15 pode significar que 15% das plantas infectadas são mortas ou que a capacidade de reprodução das plantas é reduzida em 15%) em uma população de plantas hospedeiras resulta em uma série de oscilações na densidade das plantas e tais oscilações são seguidas por um período longo de equilíbrio. Isto significa que a densidade de plantas no estágio de equilíbrio é determinada pela agressividade do patógeno. Com $K = 0,66$ o equilíbrio foi atingido com uma densidade de plantas menor do que com $K = 0,15$, e este equilíbrio pode sofrer pequenas oscilações periódicas quando o valor K aumenta um pouco ($K = 0,68$). Por outro lado, quando o valor de K é alto ($K = 0,90$) pode

ocorrer uma alta oscilação na densidade de plantas hospedeiras, com períodos alternados de altas e baixas densidades no tempo. A conclusão destes autores foi de que a eficiência de um patógeno em regular a população de uma planta hospedeira está relacionada com o nível de sua agressividade. Estes estudos de simulação da dinâmica da interação de patógenos com plantas hospedeiras mostram que aqueles patógenos que possuem altos níveis de agressividade (K) não proporcionam um equilíbrio na população de plantas daninhas a longo prazo e podem ocorrer níveis de doenças altos e baixos de forma alternada durante algum tempo. Portanto, tais patógenos não são bons candidatos para o controle biológico clássico, mas sim para a estratégia inundativa ou bio-herbicida.

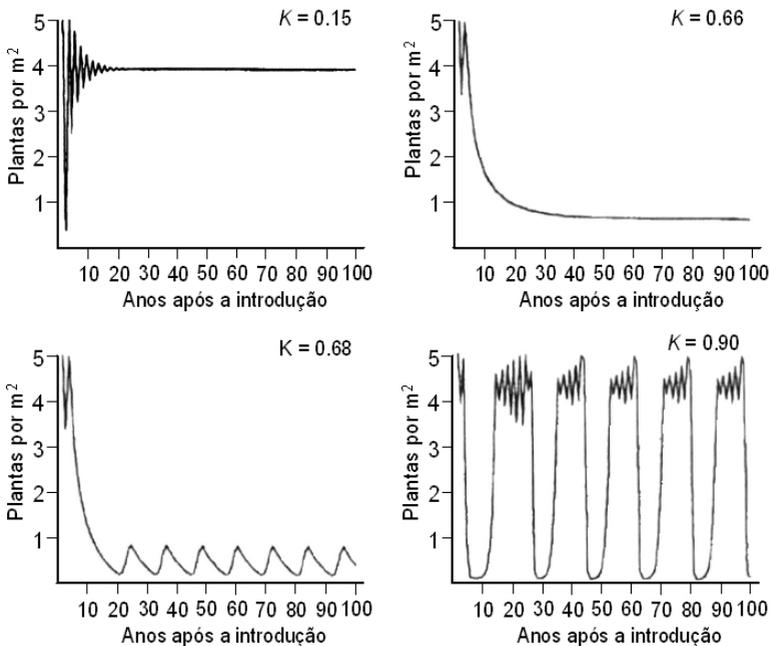


Figura 1. Simulação da influência do nível de agressividade dos fitopatógenos (K) na dinâmica da densidade de plantas, onde os valores de K próximos de zero e de um significam a ocorrência de doenças pouco severas e muito severas, respectivamente. Adaptado de [Tebeest et al. \(1992\)](#).

Um fator que pode limitar a utilização do controle biológico clássico é o fato de que este depende da introdução de insetos ou patógenos exóticos, e a importação de patógenos de um país para outro está sujeita a

regulações legislativas. Na maioria dos países, um complexo trâmite burocrático precisa ser seguido para a efetivação da entrada de novos agentes de biocontrole a fim de que os riscos de entrada de organismos indesejados sejam minimizados. De modo geral, o risco real associado à introdução de insetos fitófagos ou de patógenos de plantas está associado à falta de conhecimentos sobre a biologia destes organismos, principalmente de seus hábitos ou tendências em ampliar o seu círculo de plantas hospedeiras e de sua capacidade de recombinação com espécies nativas. De modo geral, o sucesso ou eficiência do método clássico de controle biológico somente pode ser avaliado após um período de 10 a 20 anos da introdução dos inimigos naturais. A taxa de sucesso do estabelecimento dos agentes nas áreas introduzidas tem atingido o nível de 60%, sendo que em apenas 30% dos casos têm-se atingido níveis de controle considerados completos (Schroeder, 1992; McFadyen, 1998).

3. Estratégia Inundativa

A estratégia inundativa tem sido aplicada somente quando fungos, bactérias ou vírus fitopatogênicos são utilizados como agentes de biocontrole e consiste na aplicação massiva de doses de inóculo do patógeno sobre uma grande população de plantas daninhas, com o objetivo de criar uma rápida epidemia da doença e levar as plantas rapidamente à morte. Neste caso, ocorre a manipulação humana direta das fases de produção e de distribuição do inóculo do patógeno (esporos, fragmentos de hifas ou clamidósporos de fungos, assim como células bacterianas e partículas virais) e, de modo geral, esta estratégia é mais bem empregada no controle de plantas daninhas anuais em áreas cultivadas ou em áreas onde é desejado o controle imediato das plantas daninhas. O inóculo do patógeno é aplicado sobre a população de plantas daninhas alvo através de métodos convencionais de aplicação de produtos fitossanitários e pode ser integrado com outros programas de aplicações de pesticidas. Como no caso dos herbicidas químicos, há a necessidade de aplicações regulares do agente de controle biológico porque o mesmo geralmente não sobrevive em uma densidade suficiente ou não se multiplica nos restos de cultura. Neste caso, devido às similaridades com os herbicidas químicos, a estratégia inundativa também tem sido chamada de bio-herbicida ou mico-herbicida.

O termo mico-herbicida foi proposto pela primeira vez por Daniel et al. (1973) para designar herbicidas microbianos à base de fungos. Entretanto, bio-herbicidas são patógenos de plantas empregados como agentes de controle de plantas daninhas tanto na estratégia inundativa como na estratégia aumentativa. No primeiro caso, o bio-herbicida é aplicado regularmente em toda a área em que se deseja o controle, enquanto que no segundo, o bio-herbicida é aplicado regularmente somente em parte da área. A estratégia aumentativa será discutida mais adiante.

Em contraste com o controle biológico clássico, o qual é patrocinado basicamente pelo setor público, os bio-herbicidas representam uma opção de negócio para as empresas privadas. O fato de serem utilizados de forma similar aos herbicidas químicos torna os herbicidas microbianos bastante atrativos ao desenvolvimento industrial. Os bio-herbicidas seguem as mesmas regulamentações em relação à formulação, padronização, empacotamento e comercialização dos pesticidas em geral. É esperado dos herbicidas microbianos fornecidos para o uso comercial que os mesmos proporcionem um alto índice de mortalidade ou de dano às plantas daninhas e o controle deve ser rápido e facilmente obtido sob condições normais das práticas agrícolas.

Os primeiros herbicidas microbiológicos foram registrados nos EUA, no início da década de 80. O primeiro fungo utilizado comercialmente como bio-herbicida foi *Phytophthora palmivora*, sob o nome comercial de De Vine[®], em 1981. Este bio-herbicida foi desenvolvido para o controle de *Morreria odorata*, uma planta daninha que ocorre em pomares de citros no Estado da Flórida, EUA. Esta planta foi introduzida nos EUA como uma planta ornamental, da América do Sul, e tornou-se uma planta daninha que chegou a colonizar cerca de 120 mil hectares de citros naquele país. O bio-herbicida De Vine foi desenvolvido comercialmente pela Abbott Laboratories, Chicago, IL, EUA, a partir de um isolado do fungo *P. palmivora* obtido em um pomar de citros da Flórida. Este bio-herbicida consiste em uma formulação líquida contendo clamidósporos (esporos de sobrevivência) do fungo que é aplicada através de pulverização em pós-emergência da planta, produzindo um nível de controle (mortalidade) de 90 a 100% com apenas uma aplicação. A morte da planta daninha resulta da seca de seus ramos e folhas causada pela colonização do fungo. Um fato curioso é que a alta eficiência deste bio-herbicida restringiu a sua vida comercial, uma vez que o fungo permanece ativo no solo por vários anos, dispensando com isto a necessidade de aplicações continuadas do produto. Atualmente, De Vine é produzido e comercializado nos EUA somente mediante pedidos antecipados para a empresa fabricante.

O fungo *Colletotrichum gloeosporioides* f.sp. *aeschynomene* foi desenvolvido também nos EUA e registrado como um bio-herbicida com o nome comercial de Collego[®] pela empresa Upjohn Company, Kalamazoo, MI, EUA, para o controle do angiquinho (*Aeschynomene virginica*), em 1982. Esta planta daninha, além de causar danos a algumas culturas devido à competição direta, também possui sementes que são difíceis de ser separadas das sementes de arroz. Collego (atualmente registrado nos EUA com o nome de Lockdown[®]) foi desenvolvido para o controle de *A. virginica* em lavouras de arroz e soja em vários estados americanos, apresentando um nível de controle superior a 90%. A morte de plântulas resulta da infecção e colonização do fungo em colmos, pecíolos e folhas da planta. Collego é formulado como pó molhável contendo 15% de esporos vivos e

secos do fungo (conídios) e 85% de ingredientes inertes. Atualmente, este bio-herbicida é produzido e comercializado pela empresa Encore Technologies, Minnetonka, MN, EUA.

O bio-herbicida Biomal[®] é baseado em esporos (conídios) do fungo *C. gloeosporioides* f.sp. *malvae* e foi registrado no Canadá em 1992 para o controle de *Malva pusilla* em várias culturas. Este fungo infecta folhas, pecíolos e colmos, causando a morte das plantas dentro de 17 a 20 dias após a inoculação, atingindo um nível de controle de 90 a 100%. Apesar de registrado pela empresa PhilomBios, Saskatchewan, Canadá, este bio-herbicida ainda não está disponível comercialmente.

O fungo *Alternaria cassiae* tem sido estudado extensivamente para o controle de *Cassia obtusifolia*, uma importante planta invasora em lavouras de soja e algodão nos EUA, assim como no cerrado brasileiro. Um bio-herbicida, formulado à base de conídios deste fungo, chegou ao estágio de desenvolvimento comercial pela Mycogen Corporation sob o nome de Casst[®], porém o projeto não teve continuidade.

O fungo *Cercospora rodmanii* mostrou bom potencial para ser utilizado como bio-herbicida para o controle de aguapé nos EUA, porém o fabricante descontinuou o projeto devido à existência de herbicidas químicos, os quais proporcionam o controle mais rápido e econômico desta planta daninha aquática.

Patógenos pouco específicos também têm sido utilizados como herbicidas biológicos. Por exemplo, o fungo de solo *Sclerotinia sclerotiorum* tem sido utilizado nos EUA para o controle de *Cirsium arvense*, *Centaurea maculosa* e *Taraxacum officinale* em pastagens de gramíneas e em campos de golfe. Apesar deste fungo possuir um amplo círculo de plantas hospedeiras, que inclui muitas culturas de importância comercial, o mesmo tem-se mostrado apropriado para ser utilizado como agente de controle biológico de plantas daninhas de folhas largas em meio a gramíneas. Deve ser ressaltado que nestas áreas não poderão ser cultivadas espécies de interesse comercial que sejam susceptíveis ao patógeno por um longo tempo. Até o momento, o único exemplo de bio-herbicida formulado com vírus foi desenvolvido no estado da Flórida (EUA), para o controle de joá-bravo (*Solanum viarum*), uma planta daninha exótica naquele país, e que causa danos principalmente em pastagens. Neste caso, foi desenvolvido o bio-herbicida Solvinix[®], o qual é formulado com partículas de *Tobacco mild green mosaic* tobamovírus. Este bio-herbicida deve ser pulverizado na parte aérea das plantas, e pode proporcionar 100% de controle quando aplicado em plantas jovens (Charudattan & Hiebert, 2007).

Na África do Sul, o bio-herbicida Stumpout[®] foi desenvolvido com base no fungo da classe basidiomycetes, *Cylindrobasidium leave*, para o controle de arbustos e árvores invasoras. Este fungo é aplicado após o corte dos arbustos e das árvores para prevenir a sua rebrota, e embora possua um

círculo amplo de plantas hospedeiros, somente é agressivo quando inoculado em plantas com ferimentos (Morris, 1996).

O primeiro bio-herbicida formulado com base em células bacterianas foi Camperico[®], no Japão. Este bio-herbicida foi desenvolvido utilizando-se um isolado de *Xanthomonas campestris* pv. *poeae* que causa murcha em *Poa annua*, uma gramínea invasora em campos de golfe. Outros exemplos, ainda em estudo, são a utilização da bactéria *Pseudomonas syringae* pv. *tagetes* para o controle de *Cirsium arvense* e de *Agrobacterium* spp. para o controle de algumas plantas invasoras em pastagens nativas, como *Euphorbia esula*, *Acroptilon repens* e *Centaurea diffusa*. Outra linha de pesquisa mais recente é a utilização de rizobactérias para o controle de plantas daninhas invasoras gramíneas, como é o caso do estudo da utilização de *Pseudomonas fluorescens* para o controle de capim bromo (*Bromus tectorum*) (Mortensen, 1998).

Um aspecto crítico do desenvolvimento de herbicidas microbiológicos, assim como no caso do controle biológico clássico, é a avaliação dos danos em espécies de plantas que não são o alvo desejado. Para isto são feitos testes de patogenicidade em espécies de plantas próximas e também em espécies distantes botanicamente da espécie alvo. Neste caso, aplica-se o método centrífugo-filogenético, onde o a ação do bio-herbicida é avaliada inicialmente sobre um grupo de plantas que são próximas taxonomicamente da espécie alvo, expandindo-se em seguida a avaliação para espécies mais distantes taxonomicamente. Outros aspectos que são críticos ao funcionamento dos bio-herbicidas e que podem determinar a sua longevidade no mercado são: (i) a influência das condições ambientais sobre a infecção e colonização da planta pelo patógeno; (ii) a influência da idade dos tecidos e do estado nutricional da planta sobre a infecção e colonização do patógeno e o desenvolvimento da doença; (iii) a magnitude da variabilidade genética da planta alvo; e (iv) a estabilidade genética do patógeno, principalmente em relação ao seu grau de virulência. Este último aspecto é muito importante, pois alguns patógenos perdem a capacidade de causar doença após serem multiplicados *in vitro* por algumas gerações.

Apesar de todo o esforço de pesquisa nas últimas décadas, poucos bio-herbicidas têm chegado ao mercado. Vários fatores concorrem para isto, o principal é o fato de que os bio-herbicidas são específicos para o controle de determinadas plantas daninhas e atingem nichos e mercado que são considerados pequenos pelas grandes empresas de pesticidas agrícolas. O desenvolvimento de bio-herbicidas implica na necessidade de desenvolvimento de processos tecnológicos apropriados para produção massal, formulação e de preservação do inóculo até a fase de uso, bem como para a distribuição do inóculo no campo. Um ponto crítico para a eficiência dos bio-herbicidas é a influência dos fatores do ambiente, principalmente a duração do molhamento foliar após a sua aplicação. Estes obstáculos têm grande chance de serem superados num futuro próximo graças às novas tecnologias de

formulação baseadas em emulsões e polímeros, as quais podem reduzir a influência do tempo de molhamento na eficiência dos bio-herbicidas.

4. Estratégia Aumentativa

A estratégia aumentativa tem sido implementada com insetos fitófagos e fungos fitopatogênicos de difícil produção em larga escala e que são aplicados periodicamente somente em partes das áreas em que se pretende obter o controle. Esta estratégia tem sido apropriada para o controle de tiririca (*Cyperus rotundus* e *C. esculentus*) com a ferrugem *Puccinia caniculata* em regiões onde a mesma é endêmica. Neste caso, a ferrugem se desenvolve naturalmente no campo e liberações anuais de esporos do fungo, na primavera, causam a inibição do florescimento e da formação dos tubérculos da planta. O fungo é capaz de se dispersar rapidamente sobre a região, provocando uma epidemia durante a estação de cultivo. Em 1993, o bio-herbicida Dr. Biosedge[®], formulado com esporos (urediniosporos) deste fungo foi registrado nos EUA para o controle da tiririca amarela ou tirição (*C. esculentus*), porém o maior problema da utilização deste fungo como bio-herbicida tem sido a produção de esporos em larga escala, uma vez que este fungo é um organismo biotrófico (Phatak et al., 1987; Tebeest, 1996).

Esta estratégia é diferente do controle biológico clássico, em que após uma única introdução espera-se que o agente se disperse sobre uma grande área; e também é diferente da estratégia bio-herbicida, onde se espera uma morte rápida das plantas imediatamente após a aplicação do agente.

Existem poucos exemplos da utilização da estratégia aumentativa com insetos. O mais ilustrativo é o controle da planta aquática *Salvinia molesta* na Austrália, por meio da liberação periódica do curculionídeo *Cyrtobagous salviniae*.

5. O Controle Biológico de Plantas Daninhas no Brasil

A pesquisa na área de controle biológico de plantas daninhas no Brasil é recente. Os maiores esforços têm sido direcionados para a busca, identificação e avaliação de patógenos e de insetos com potencial de utilização no controle biológico, principalmente de *Cyperus rotundus*, *Sena obtusifolia*, *Euphorbia heterophylla* e *Eichhornia crassipes* (Yorinori & Gazziero, 1990; Figueiredo, 1995; Fontes et al., 1995; Pomella et al., 1998; Pitelli et al., 1998). Para o controle destas plantas daninhas, a pesquisa tem se direcionado principalmente para a estratégia inundativa, embora o controle biológico clássico também tenha sido considerado em alguns casos. No Brasil, o programa pioneiro de controle biológico inundativo de plantas daninhas iniciou-se na EMBRAPA-CNPSO, no início dos anos 80, para o controle do leiteiro (*E. heterophylla*) com o fungo *Bipolaris euphorbiae*

(Yorinori & Gazziero, 1990). A revisão feita por Figueiredo (1995) sobre herbicidas microbiológicos oferece mais detalhes sobre os trabalhos discutidos aqui, incluindo também outros estudos feitos no nosso país. No Brasil também merece destaque nos últimos anos a pesquisa visando o controle biológico de plantas daninhas aquáticas, principalmente *Egeria* spp. e *E. crassipes*, as quais têm causado problemas econômicos principalmente em represas de usinas hidroelétricas na região sudeste do país (Pitelli, 1998).

A pesquisa em controle biológico de plantas daninhas no Brasil tem sido liderada principalmente pelos Drs. Eliana G. Fontes (CENARGEN/EMBRAPA), Robinson A. Pitelli (UNESP-Jaboticabal) e Robert W. Barreto (UFV).

6. Perspectivas do Controle Biológico de Plantas Daninhas

Dentre as razões que fundamentam a necessidade de ampliar os métodos tradicionais de controle de plantas daninhas, destaca-se a sua inaplicabilidade em certos ecossistemas, aliado às pressões da opinião pública sobre os seus efeitos nocivos ao homem e ao ambiente. Neste sentido, apesar do progresso alcançado nas últimas décadas, ainda existe a necessidade de muita pesquisa em termos de busca e identificação de novos agentes de biocontrole, conhecimentos sobre a biologia destes agentes, de sua eficiência e segurança, assim como de tecnologia para sua produção e distribuição eficiente em grande escala. No caso dos bio-herbicidas, por exemplo, um dos principais pontos que estrangulam o seu desenvolvimento e utilização comercial é a dependência da eficiência dos agentes em relação aos fatores ambientais. Outro fator que deve ser considerado quando se pensa em bio-herbicidas como um negócio é o tamanho de mercado, o qual é menor, geralmente, do que o de herbicidas químicos. Para explorar estes mercados, a tendência é de ocorrer o envolvimento não de grandes empresas, mas sim de pequenas e médias empresas de biotecnologia. Os bio-herbicidas, ao invés de serem direcionados para grandes mercados, atenderão apenas determinados nichos de mercado.

Os programas de pesquisa, sejam de controle biológico clássico bem como aqueles que utilizam as estratégias inundativa e aumentativa, têm sido direcionados para atender, principalmente, problemas que não têm sido eficientemente resolvidos pelos outros métodos de controle. É o caso de áreas de difícil acesso, ecossistemas aquáticos, pastagens naturais extensivas, áreas florestais e áreas sob linhas de transmissão de eletricidade. Em muitos destes casos, a utilização de herbicidas químicos ou o controle mecânico não é possível ou não é desejável devido à limitações técnicas ou legais. Mais recentemente, outro nicho de mercado que apresenta um grande potencial para ser explorado pelo controle biológico são as espécies de plantas daninhas que apresentam populações resistentes a herbicidas químicos.

A literatura em controle biológico é relativamente compacta e um catálogo contendo uma lista completa e atualizada de todos os agentes estudados e utilizados mundialmente foi publicada por [Julien & Griffiths \(1999\)](#). Também, uma visão dos trabalhos correntes nesta área pode ser obtida através da leitura dos anais do *International Symposia on the Biological Control of Weeds*, realizados a cada três ou quatro anos. Além disto, os desenvolvimentos nesta área também podem ser acompanhados através da internet nos *sites* relacionados na Tabela 2.

Tabela 2. Principais *sites* relacionados ao controle biológico de plantas daninhas.

Instituição e Endereço
International Organization for Biological Control (IOBC) http://www.unipa.it/iobc/
University of Florida Center for Aquatic and Invasive Plants http://plants.ifas.ufl.edu/
Weeds in Australia – Biological Control http://www.weeds.gov.au/management/biological-control.html
USDA European Biological Control Laboratory http://www.ars-ebcl.org/
Weed Feeders/Cornell University http://www.biocontrol.entomology.cornell.edu/weed.html
Biological Control of Weeds on the Prairie (Canadá) http://www.agriculture.gov.sk.ca/Biological_Control_Weeds

Referências

- Adams, E.B., Fungi in classical biocontrol of weeds. In: Burge, N.M., (Ed.). *Fungi in Biological Control Systems*. Manchester, UK: Manchester University Press, 1988. p. 111–123.
- Center, T., Biological control of weeds: waterhyacinth and waterlettuce. In: Rosen, D.; Bennett, F.D. & Capinera, J.L., (Eds.). *Pest Management in the Subtropics. Biological Control – a Florida Perspective*. Andover, EUA: Intercept, 1996. p. 481–521.
- Charudattan, R., Inundative control of weeds with indigenous fungal pathogens. In: Burge, N.M., (Ed.). *Fungi in Biological Control Systems*. Manchester, UK: Manchester University Press, 1988. p. 86–110.
- Charudattan, R., Prospects for biological control of weeds by plant pathogens. *Fitopatol Bras*, 15:13–19, 1990.
- Charudattan, R. & Hiebert, E., A plant virus as a bioherbicide for tropical soda Apple, *Solanum viarum*. *Outlooks Pest Manag*, 18:167–171, 2007.
- Charudattan, R.; Labrada, R.; Center, T.D. & Kelly-Begazo, C., *Strategies for Water Hyacinth Control*. Rome, Italy: FAO, 1996. 217 p.
- Daniel, J.T.; Templeton, G.E.; Smith, R.J. & Fox, W.T., Biological control of northern jointvetch in rice with an endemic fungal disease. *Weed Sci*, 21:303–307, 1973.
- Figueiredo, G., Herbicidas microbiológicos empregados no controle de plantas daninhas. *Rev Anu Patol Plantas*, 3:111–132, 1995.
- Fontes, E.G.; Teixeira, C.A.D.; Pires, C.S.S. & Sujii, E.R., Current status of the biological control of weeds in Brazil. In: Delfosse, E.S. & Scott, R.R., (Eds.). *Proc. of 8th International Symposium on the Biological Control of Weeds*. Melbourne, Australia: DSIR/CSIRO, 1995. p. 693.
- Grodowitz, M.J.; Center, R.D.; Confrancesco, A.E. & Freedman, J.A., Release and establishment of *Hydrellia balciunasi* (Diptera: Ephydriidae) for the biological control of the submersed aquatic plant *Hydrilla verticillata* (Hydrocharitaceae) in the United States. *Biol Control*, 9:15–23, 1997.
- Julien, M.H. & Griffiths, M.W., *Biological Control of Weeds: A World Catalogue of Agents and Their Target Weeds*. 3a edição. Wallingford, EUA: CAB International, 1999. 212 p.
- McFadyen, R.E.C., Biological control of weeds. *Annu Rev Entomol*, 43:369–393, 1998.
- Morris, M.J., The development of mycoherbicides for an invasive shrub, *Hakea sericea*, and a tree, *Acacia mearnsii*, in South Africa. In: Moran, J.V. & Hoffmann, J.H., (Eds.). *Proc. of the 9th International Symposium on the Biological Control of Weeds*. Stellenbosh, South Africa: University of Cape Town Press, 1996. p. 547.

- Mortensen, K., Biological control of weeds using microorganisms. In: Bolland, G.J. & Kuykendall, D., (Eds.). *Plant-Microbe Interactions and Biological Control*. New York, EUA: Marcel Dekker, 1998. p. 223-249.
- Phatak, S.C.; Callaway, M.B. & Vavrina, C.S., Biological control and its integration in weed management systems for purple and yellow nutsetge (*Cyperus rotundus* and *C. esculentus*). *Weed Technol*, 1:84-91, 1987.
- Pitelli, R.A., Macrófitas aquáticas no Brasil, na condição de problemáticas. In: *Anais do Workshop Sobre Controle de Plantas Aquáticas*. Brasília, DF: IBAMA, 1998. p. 12-15.
- Pitelli, R.A.; Charudattan, R. & Devalerio, J.T., Effect of *Alternaria casiae*, *Pseudocercospora nigricans*, and soybean (*Glycine max*) planting density on the biological control of sicklepod (*Senna obtusifolia*). *Weed Technol*, 12:37-40, 1998.
- Pomella, A.W.V.; Barreto, R.W. & Requia, A.C., Estudo sobre a interação *Duosporium Yamadanum* X *Cyperus rotundus* (tiririca). *Fitopatol Bras*, 21(suplemento):391, 1998.
- Schroeder, D., Biological control of weeds: a review of principles and trends. *Pesq Agropec Bras*, 27:191-212, 1992.
- Tebeest, D.O., Biological control of weeds with plant pathogens and microbial pesticides. *Adv Agronomy*, 56:115-137, 1996.
- Tebeest, D.O.; Yand, X.B. & Cisar, C.R., The status of biological control of weeds with fungal pathogens. *Annu Rev Phytopathol*, 30:637-657, 1992.
- Yorinori, J.T. & Gazziero, D.L., Control of milkweed (*Euphorbia heterophylla*) with *Helminthosporium* sp. In: *Proc. of the 7th International Symposium on the Biological Control of Weeds*. Rome, Italy: USDA-ARS, 1990. p. 571-578.

Alelopatia

Nádja de Moura Pires e Valter Rodrigues Oliveira

1. Introdução

Nas comunidades vegetais, as plantas podem interagir de maneira positiva, negativa ou neutra. É mais comum que plantas vizinhas interajam de maneira negativa, de modo que a emergência e, ou, o crescimento de uma ou de ambas são inibidos.

Às interações que se desencadeiam entre organismos vizinhos, Muller (1969) denominou de interferência. Entretanto, por ser um termo muito amplo e englobar vários mecanismos, Szczepanski (1977) dividiu-o em:

- a) alelospolia, mais comumente chamada de competição – é a interferência causada pelos organismos, que provoca a redução de um ou mais fatores de crescimento (luz, água, nutrientes, etc.) e prejudica o desenvolvimento normal de outros organismos na comunidade;
- b) alelopatia – definida como a interferência provocada por substâncias químicas produzidas por certos organismos e que, no ambiente, afetam os outros componentes da comunidade, e
- c) alelomeadiação ou interferência indireta – são alterações provocadas por organismos no ambiente físico ou biológico, com reflexo aos seres vizinhos.

Neste capítulo será dada ênfase à alelopatia. Este termo deriva de duas palavras gregas: *alleton* (mútuo) e *pathos* (prejuízo), e foi definido por Molisch em 1937, para referir-se tanto às interações bioquímicas benéficas como às prejudiciais entre todos os tipos de plantas, incluindo microrganismos (Rice, 1984). Com o passar do tempo a alelopatia vem sendo redefinida. Putnam & Duke (1978) consideram a alelopatia como efeitos prejudiciais de plantas de uma espécie (doadora) na germinação, no crescimento ou no desenvolvimento de plantas de outras espécies (receptoras). Para Rice (1984), a alelopatia compreende a liberação, por um dado organismo, de substâncias químicas no ambiente, as quais interagem com outro organismo presente no mesmo ambiente, inibindo ou estimulando o seu crescimento e, ou, desenvolvimento. Ainda, segundo Rice (1984), a alelopatia pode ocorrer entre microrganismos, entre microrganismos e plantas,

entre plantas cultivadas, entre plantas daninhas, e entre plantas daninhas e plantas cultivadas.

De acordo com [Miller \(1996\)](#) o efeito alelopático pode ser classificado em dois tipos: autotoxicidade – é um mecanismo intraespecífico de alelopatia que ocorre quando uma espécie de planta libera determinada substância química que inibe ou retarda a germinação e o crescimento de plantas da própria espécie; heterotoxicidade – ocorre quando uma substância com efeito fitotóxico é liberada por determinada planta afetando a germinação e o crescimento de plantas de outra espécie.

Observa-se assim, que o fenômeno da alelopatia é o inverso da competição pois, enquanto a primeira implica na introdução de substâncias químicas no ambiente, a segunda refere-se na remoção do ambiente de fatores de crescimento como luz, água, gás carbônico e nutrientes ([Rice, 1984](#)). Entretanto, algumas vezes, estes dois fenômenos ocorrem simultaneamente, caracterizando-se a interferência ([Seigler, 1996](#)).

2. Natureza e Função das Substâncias Alelopáticas

Substâncias alelopáticas, fitotoxinas, aleloquímicos ou produtos secundários, são as denominações dadas aos compostos químicos liberados pelos organismos no ambiente, que afetam os outros componentes da comunidade.

Nos estudos de alelopatia em plantas, um dos principais questionamentos é se os aleloquímicos envolvidos são produtos do metabolismo celular ou se são sintetizados pela planta com função específica. Alguns autores defendem a primeira hipótese, com base no fato de que estas substâncias se encontram, em maior quantidade, nos vacúolos das células das plantas, onde seriam depositadas afim de evitar a sua própria autotoxicidade ([Muller, 1966](#); [Whittaker, 1970](#)). Entretanto, esta teoria é contestada por [Swain \(1977\)](#), segundo o qual os aleloquímicos são produzidos nas células com finalidade específica e sua síntese obedece as leis da genética. Neste caso, manipulação genética de plantas com potencialidades alelopáticas poderia ser realizada, da mesma forma como tem sido feita para produtos secundários envolvidos na proteção de plantas contra insetos e fungos.

Pesquisas têm sido conduzidas para isolar e identificar a estrutura química dos aleloquímicos, existindo também diversas tentativas em agrupá-las. [Whittaker & Feeny \(1971\)](#) enquadram-nas em cinco grupos: ácido cinâmico, flavonóides, terpenóides, esteróides e alcalóides. Estes autores relataram que muitos compostos ocorrem na forma de glicosídeos e estas substâncias, que podem ser tóxicas, são combinadas com açúcares e tornam-se inócuas dentro da planta. Os glicosídeos estão comumente em solução nos vacúolos das células e, portanto, permanecem separados das funções protoplasmáticas. Outras substâncias ocorrem como polímeros (tanino, resina e látex) ou como cristais (oxalato de cálcio). Para [Putnam](#)

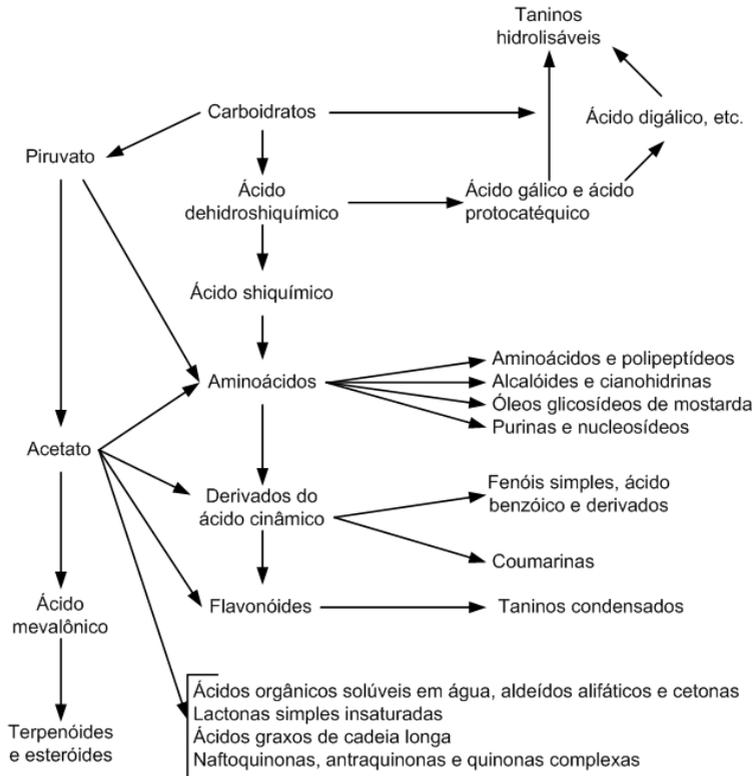


Figura 1. Produtos químicos alelopáticos e rota provável de síntese. Fonte: adaptado de [Rice \(1984\)](#).

(1988), a melhor maneira de se descrever a natureza química dos aleloquímicos é a diversidade, pois estes variam desde simples hidrocarbonetos, como o etileno, até compostos complexos, como os policíclicos, com pesos moleculares bastante elevados. Atualmente, são conhecidos cerca de 10.000 produtos secundários com ação alelopática, considerados apenas uma pequena parte da quantidade possivelmente existente na natureza ([Almeida, 1990](#)).

[Rice \(1984\)](#) propõe o agrupamento dos compostos químicos alelopáticos em 14 categorias conforme sua similaridade química, e indica as suas prováveis vias de síntese (Figura 1).

As plantas, apesar de autotróficas, são imóveis, não podendo por isto escapar do ataque dos seus inimigos. Por este motivo, a principal função

dos aleloquímicos nas plantas é a proteção ou defesa destas contra o ataque de fitopatógenos e pragas ou invasão de outras plantas (Whittaker, 1970; Lovett, 1982). Segundo Putnam & Duke (1974), a atividade biológica destes produtos depende mais da sua concentração e mobilidade do que da sua composição química, pois um composto que é tóxico para uma espécie vegetal, pode ser inócuo para outra.

3. Liberação dos Aleloquímicos no Ambiente

As substâncias alelopáticas são liberadas dos tecidos vegetais por volatilização, lixiviação, exsudação radicular e pela decomposição de resíduos vegetais (Rice, 1984). De modo geral, estas substâncias apresentam grande instabilidade, sendo rapidamente decompostas após sua liberação.

- **Volatilização:** os aleloquímicos liberados na forma volátil são de difícil detecção, identificação e quantificação. As plantas aromáticas, como a roseira (*Rosa* sp.), o eucalipto (*Eucalyptus* sp.) e o mentrasto (*Ageratum conyzoides*) representam um grupo de plantas que liberam compostos voláteis, embora tais compostos não sejam necessariamente nocivos a outras plantas. Os casos mais frequentes de ação de aleloquímicos voláteis ocorrem nas regiões áridas e de temperatura elevada. O exemplo clássico é dos chaparrais da Califórnia, onde duas espécies arbustivas, *Salvia leucocephylla* e *Artemisia californica*, liberam substâncias voláteis do grupo químico dos terpenos, as quais impedem o desenvolvimento de qualquer outra vegetação num raio de um a dois metros (Putnam, 1987). Estas substâncias voláteis são responsáveis pela diferença na composição florística no local de desenvolvimento destas plantas.
- **Lixiviação:** uma variedade de compostos químicos pode ser lixiviada da parte aérea das plantas, pela chuva ou orvalho, e carregados até o solo. Dentre os compostos mais lixiviados encontram-se os ácidos orgânicos, os açúcares, os aminoácidos, as substâncias pécicas, o ácido giberélico, os terpenóides, os alcalóides e os compostos fenólicos (Putnam, 1987). Colton & Einhellig (1980) verificaram que o lixiviado das folhas de *Abutilon theophrasti* inibiu o desenvolvimento da soja (*Glycine max*).
- **Exsudação radicular:** as plantas exudam pelas raízes inúmeros produtos químicos, alguns dos quais com características alelopáticas. É difícil saber com precisão se as substâncias encontradas no solo, às quais são atribuídos efeitos alelopáticos, são provenientes diretamente das raízes, ou produzidas pelos microrganismos a elas associadas ou liberadas pela decomposição dos resíduos orgânicos, nos quais se incluem as células mortas que se desprendem das raízes

(Almeida, 1990). Estudos realizados por Yu & Matsui (1997) mostraram que o exsudado radicular de pepino (*Cucumis sativus*) contém aleloquímicos, como o ácido cinâmico, que inibem a absorção de íons por plântulas intactas de pepino.

- **Decomposição de resíduos vegetais:** a liberação de aleloquímicos associada à decomposição de resíduos vegetais pode ocorrer diretamente pela lixiviação de substâncias presentes nos resíduos, pelo rompimento de tecidos ou células durante o processo de decomposição e extravasamento do seu conteúdo e, ainda, pela produção de substâncias pelos próprios microrganismos responsáveis pelo processo de decomposição (Rice, 1984; Almeida, 1988). Em alguns casos, os metabólitos decorrentes da decomposição são mais tóxicos do que o produto original.

Estudos conduzidos por Prates et al. (1999a,b) revelaram que o uso da parte aérea da leucena (*Leucaena leucocephala*) tanto em cobertura como incorporada ao solo, reduziu a população de plantas daninhas presentes na cultura do milho, com maior efeito sobre as de folhas largas. Isto provavelmente ocorreu devido a mimosina, aleloquímico presente nas folhas desta leguminosa, liberado pela decomposição do material vegetal (Chou & Kuo, 1986).

A ação alelopática produzida por microrganismos associados à decomposição de resíduos vegetais tem sido verificada em alguns casos. O trigo (*Triticum aestivum*) semeado em solo contendo restos da mesma cultura, no sistema de plantio direto, apresenta, às vezes, crescimento e desenvolvimento retardado, causado por uma fitotoxina exsudada pelo fungo *Penicillium urticae*, associado à decomposição da palha (Almeida, 1990).

Os aleloquímicos liberados pelos resíduos vegetais em decomposição, encontram-se distribuídos desuniformemente no solo, concentrando-se nas proximidades dos resíduos. Assim, a extensão do efeito dos aleloquímicos é dependente do maior ou menor contato entre o sistema radicular e os fragmentos dos resíduos vegetais (Patrick, 1971).

4. Metodologias de Estudo da Alelopatia

Nos estudos para evidenciar e provar a presença do efeito alelopático de algum organismo, Fuerst & Putnan (1983) sugerem um protocolo específico com uma série de etapas, semelhante aos postulados de Koch, conforme segue:

1. Demonstrar a interferência usando controles satisfatórios, descrever a sintomatologia e, quantificar a redução no crescimento;
2. Isolar, caracterizar e conduzir ensaios com o aleloquímico, em espécies que foram afetadas anteriormente. Identificar a substância química;

3. Simular a interferência pela aplicação da(s) toxina(s) em doses semelhantes aquelas presentes na natureza, nos estádios apropriados de suscetibilidade;
4. Monitorar a liberação do aleloquímico pelo organismo doador, detectando sua presença e movimentação no ambiente (solo, planta, ar) e sua absorção pelo organismo receptor.

A demonstração dos efeitos alelopáticos tem sido feita experimentalmente por meio da aplicação de extratos de uma planta a sementes ou plântulas de outras espécies. Várias são as técnicas utilizadas para se extrair os aleloquímicos. Normalmente, estas substâncias são extraídas de partes vegetais trituradas e colocadas em contato com um extrator orgânico (álcool, acetona, éter, clorofórmio, etc.) ou água, obtendo-se, após filtração, o extrato contendo os compostos alelopáticos. Este deve ser testado em plantas sensíveis (indicadoras) como a alface, a mais sensível de todas as espécies estudadas, o tomate ou o rabanete (Medeiros, 1989). Deve-se ressaltar, no entanto, que os métodos que envolvem o maceramento ou o aquecimento dos tecidos, ou ainda que usam solventes que não a água, extraem substâncias que em condições normais não seriam liberadas, podendo-se obter resultados que na natureza não são observados (Inderjit & Dakshini, 1995).

Na verdade, é relativamente fácil extrair de uma planta produtos metabólicos que podem inibir o crescimento de outra. Porém, é extremamente difícil provar em estudos de campo, que o efeito inibitório está relacionado à liberação de um aleloquímico e não à competição por água, luz e nutrientes. Deve ser considerado, também, que nem sempre os extratos obtidos de vegetais podem ser considerados como material experimental adequado, pois eles não ocorrem na natureza. É importante lembrar ainda, que testes de laboratório e de casa de vegetação têm que ser tratados com cautela pois, no campo, um grande número de compostos orgânicos pode ser lixiviado do solo ou decomposto pela ação de microrganismos (Rodrigues et al., 1992).

A técnica do bioensaio é um procedimento integrante em todos os estudos de alelopatia. Esta técnica é baseada na resposta biológica de um organismo vivo – plantas superiores ou microrganismos – a uma determinada substância ou, ainda, a metabólitos, servindo como indicativo da presença e, ou, concentração de um composto químico em um substrato (Santelmann, 1977; Streibig, 1988). É uma ferramenta útil e necessária para determinar o potencial alelopático de um organismo ou de um conjunto de substâncias e em todas as etapas de isolamento, fracionamento e identificação de compostos bioativos (Leather & Einhellig, 1986) (Figura 2).

É essencial que em cada bioensaio, os tratamentos com o aleloquímico sejam comparados com tratamentos-controle e com curvas de dose-resposta

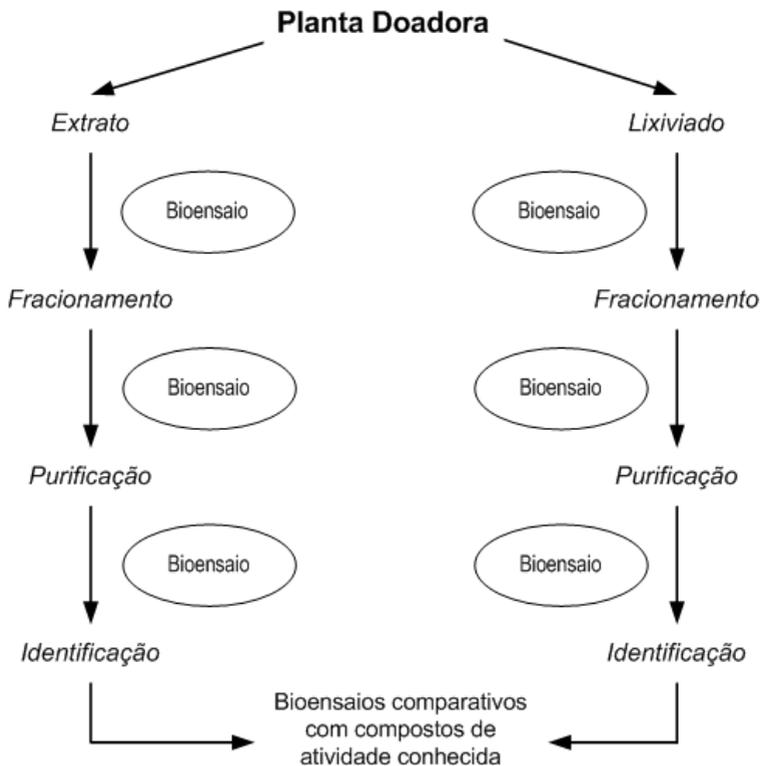


Figura 2. Esquema de utilização de bioensaios para o fracionamento, purificação e identificação de aleloquímicos. Fonte: adaptado de [Leather & Einhellig \(1986\)](#).

do padrão de atividade conhecida ([Leather & Einhellig, 1986](#)). Esta curva do padrão é então usada para estimar a quantidade do aleloquímico existente no material em estudo.

Uma das grandes limitações desta técnica é a falta de padronização, incluindo informação completa da fonte do aleloquímico, método de extração, concentração empregada no estudo, ausência de comparação com compostos conhecidos, condições ambientais e planta-teste empregada ([Leather & Einhellig, 1986](#)). Entretanto quase todos os trabalhos descrevem algum tipo de bioensaio que é usado para demonstrar a atividade alelopática.

Outro problema dos bioensaios é que, normalmente, os efeitos alelopáticos dos extratos resultam mais das atividades sinérgicas de vários aleloquímicos do que da atividade de um produto isolado ([Williamson, 1990](#)).

Em geral, a concentração de cada um está abaixo do mínimo necessário para que atue isoladamente. Além disto, em algumas plantas a liberação de aleloquímicos em concentrações ativas só começa após a planta atingir um determinado estágio de crescimento (Inderjit, 1996). Por exemplo, a planta daninha *Parthenium hysterophorus*, apresenta máxima liberação de aleloquímicos pelas raízes no estágio de florescimento (Kanchan & Jayachandran, 1979). A *Avena fatua* apresenta potencial alelopático sobre o trigo, mas somente a partir do estágio de quatro folhas (Schumacher et al., 1983).

O bioensaio mais utilizado para testar a atividade dos aleloquímicos é a inibição (ou algumas vezes o estímulo) da germinação de sementes. Em geral, este bioensaio é conduzido em placas de Petri, colocando-se as sementes das espécies selecionadas em um substrato saturado com a solução teste. Este estudo é conduzido em ambiente com fotoperíodo e temperatura ótimos para a germinação das espécies selecionadas. A sensibilidade deste bioensaio varia com a espécie em estudo, mas mesmo assim, é um teste de grande validade para o estudo da alelopatia, pois é um método simples, rápido e requer pequena quantidade da solução a ser estudada.

Um avanço substancial nos métodos para avaliação de efeitos alelopáticos foi desenvolvido por Tang & Young (1982), cultivando o capim-hemarthria (*Hemarthria altissima* (Pior.) Stapf & Hubbard) em areia irrigada continuamente com solução nutritiva circulante através do sistema radicular e de uma coluna, contendo uma resina adsorvedora de metabólitos hidrofóbicos extra-celulares. As colunas foram eluídas com metanol e o líquido coletado foi separado nas frações neutra, ácida e básica. Bioensaios dos exsudatos radiculares, usando sementes de alface e a combinação com cromatografia de papel e de camada delgada, mostraram que os inibidores eram, principalmente, compostos fenólicos. Estes autores concluíram que este método de coleta de exsudatos radiculares foi altamente eficiente quando comparado aos métodos convencionais de extração com solventes, pois o sistema radicular não foi perturbado e, deste modo, o método é muito útil em estudos relacionados à química da rizosfera.

Para a detecção de substâncias voláteis, o método mais usado consiste em se colocar a planta doadora (fonte das substâncias) ou partes desta, juntamente com a planta-teste (indicadora) em ambiente fechado, normalmente em campânulas de vidro, de forma que o único veículo de comunicação entre elas seja a atmosfera. Para se amostrar os produtos voláteis dispersos no ar do interior da campânula e responsáveis pelos efeitos alelopáticos, utiliza-se uma seringa. A amostra coletada é então analisada por cromatografia gasosa (Almeida, 1988).

Nos estudos envolvendo a parte aérea das plantas ou os resíduos vegetais, os lixiviados poderão ser obtidos pela lavagem destas partes com água. O extrato recolhido é então usado em bioensaios de germinação de sementes das plantas-teste, geralmente em placas de Petri.

Para o estudo de compostos fenólicos, existem vários tipos de bioensaios conduzidos em laboratório, para investigar o potencial alelopático de plantas (Inderjit, 1996). Shilling & Yoshikawa (1987) desenvolveram um bioensaio para determinar a atividade alelopática dos compostos fenólicos α -phenylacético e *p*-ethoxybenzoico quantitativamente e qualitativamente, utilizando *Echinochloa crusgalli* e *Sesbania exaltata* como espécies de plantas-teste. Verificaram que a biomassa fresca da parte aérea e das raízes foram as melhores características para se avaliar a fitotoxicidade dos compostos fenólicos. Outros estudos têm mostrado que o crescimento de raiz é uma característica mais sensível do que o crescimento da parte aérea (Blum & Rebbeck, 1989; Lyu & Blum, 1990; Inderjit & Dakshini, 1995).

Na maioria das vezes estes bioensaios são utilizados para avaliar a atividade alelopática ou para identificar e isolar aleloquímicos presentes nas plantas com potencial alelopático. Atualmente, as técnicas de cromatografia líquida (HPLC), gasosa e espectroscopia de massa, têm sido utilizadas com sucesso para as análises quantitativas e qualitativas dos compostos fenólicos (Dey & Harbone, 1990; Inderjit & Dakshini, 1995).

Provas de alelopatia requerem não somente protocolos rigorosos, mas, também, esforços cooperativos entre pesquisadores de várias disciplinas, incluindo não só os envolvidos com a cultura em estudo bem como especialistas em bioquímica, química, herbicidas, microbiologia, solos, e outras áreas.

5. Mecanismos e Modo de Ação dos Aleloquímicos

A elucidação dos mecanismos e do modo pelos quais os aleloquímicos modificam o crescimento e o desenvolvimento das plantas têm sido para os pesquisadores um contínuo desafio, isto em razão da limitada disponibilidade de trabalhos de pesquisa que abordam esta questão. De acordo com Einhellig (1986), geralmente, os aleloquímicos são avaliados pelo seus impactos na germinação das sementes ou em algum aspecto do crescimento das plantas, sem levar em consideração a sequência de eventos celulares que pode ocorrer devido à redução no crescimento.

Uma maneira de se avaliar o modo de ação de um aleloquímico específico, seria por meio do monitoramento do efeito deste produto sobre as principais funções das plantas. As pesquisas neste sentido tem permitido concluir que os aleloquímicos interferem com muitos dos processos metabólicos primários e no sistema de crescimento das plantas. De uma maneira geral, a ação dos aleloquímicos se resume à interferência nas atividades vitais das plantas, ou seja, na fotossíntese, respiração, assimilação de nutrientes, síntese de proteínas, atividades enzimáticas, permeabilidade da plasmalema e no desenvolvimento da planta (Almeida, 1988; Siqueira et al., 1991).

5.1 Regulação do crescimento

- **Divisão celular:** A divisão e o alongamento celular são fases essenciais do crescimento e desenvolvimento das plantas e geralmente os inibidores de crescimento podem modificar estes eventos. Substâncias voláteis de *Salvia leucophylla*, principalmente cineole e cânfora reduziram a divisão e o alongamento e aumentaram o diâmetro de células da radícula e do hipocótilo de pepino (Muller, 1965).
- **Síntese orgânica:** Vários compostos fenólicos modificam a biossíntese dos principais constituintes das plantas e a distribuição de carbono nas células. Van Sumere et al. (971) verificaram que coumarina, grupos dos ácidos cinâmico e benzóico, além dos aldeídos, inibiram a absorção e incorporação de ^{14}C -fenilalanina pela levedura (*Saccharomyces cerevisiae*). Testes adicionais com coumarina e ácido ferúlico mostraram que estes eventos também foram suprimidos em sementes de alface (*Lactuca sativa*) e embriões de cevada (*Hordeum vulgare*). De acordo com Einhellig (1986) a inibição da síntese de proteínas pelos ácidos cinâmico e ferúlico foi um indicador seguro da ação destes ácidos sobre o crescimento das plantas de alface. Em contrapartida, a adição de 50 μM de ácido clorogênico em calos de *Prunus avium*, causou proliferação de tecido e elevação na taxa de síntese de proteínas, sugerindo assim, que várias enzimas foram estimuladas por esta concentração de polifenóis (Feuch & Schmid, 1980). Conclui-se, portanto, que aparentemente, a influência de compostos fenólicos no metabolismo nem sempre é previsível.
- **Interações com hormônios:** Até hoje tem sido uma intrigante questão para a pesquisa saber como os aleloquímicos influenciam o delicado balanço de hormônios envolvidos no crescimento das plantas. Segundo Einhellig (1986), existem evidências que um dos mecanismos de ação dos aleloquímicos fenólicos é a alteração no nível do ácido indolacético (AIA), embora outras substâncias como a escopoletina e os ácidos clorogênico, cinâmico e benzóico inibam ou estimulem o nível de AIA. Com base em alguns estudos, Lee et al. (1982) concluíram que os ácidos fenólicos podem ser divididos em dois grupos: supressores da destruição do AIA, como os ácidos clorogênico, caféico e ferúlico e estimulantes da AIA oxidase, como os ácidos *p*-cumárico, *p*-hidroxibenzóico e vanílico. Alguns polifenóis reduzem o crescimento das plantas por ligarem-se ao ácido giberélico (GA), enquanto outros promovem o crescimento por ligarem-se ao ácido abscísico (ABA). Em bioensaio com ervilha e pepino, o tanino inibiu o crescimento das plantas induzido pelo GA (Corcoran et al., 1972). Pesquisas adicionais são necessárias para elucidar como os aleloquímicos relacionam-se com a atividade hormonal e, por conseguinte,

inibem o crescimento das plantas. Pelas informações disponíveis pode-se inferir que em alguns casos e em algum grau os efeitos dos aleloquímicos estão envolvidos nestas interações.

- **Efeitos na atividade de enzimas:** Atualmente já se sabe que os compostos fenólicos interferem na atividade da AIA oxidase e amilase, assim como outros aleloquímicos alteram a síntese e função de muitas enzimas. (Jain & Srivastava, 1981) observaram que a atividade da nitrato redutase em milho aumentou com a adição de 10 μM de ácido salicílico e foi inibida com 1000 μM . Em várias situações os aleloquímicos têm inibido proteinases e enzimas pectolíticas, catalases, peroxidases, fosforilases, celulasas e outras (Rice, 1984). Em nenhum caso foi estabelecido se tais efeitos são a ação primária causando a redução do crescimento.

5.2 Mecanismo respiratório

Alguns aleloquímicos, como por exemplo os monoterpenos, são capazes de alterar a taxa respiratória de algumas plantas. Einhellig (1986) supõe que estas substâncias são tóxicas, pois em testes de laboratório com trigo (*Triticum aestivum*), alguns dos monoterpenos aumentaram e outros diminuíram a respiração das plantas.

Uma ampla série de compostos como as quinonas, os flavonóides e o ácido fenólico interfere com as funções mitocondriais. Stenlid (1970) verificou que os flavonóides interferem com a produção de ATP, enquanto as quinonas inibem a absorção de O_2 , embora esta última em nível reduzido possa estimular o processo respiratório. Outras pesquisas mostram que os ácidos *p*-cumárico, cinâmico e 2-metlinaftoquinona reduzem a razão ATP/O em suspensão mitocondrial de levedura, indicando que houve inibição da fosforilação oxidativa (Putnam, 1987).

Conforme (Einhellig, 1986), a maioria dos estudos para avaliar o efeito de algum aleloquímico no metabolismo respiratório é realizada em nível de enzimas, mitocôndrias isoladas e fragmentos de tecidos, dificultando a avaliação destas substâncias sobre uma planta intacta. De acordo com este autor, nem todos os aleloquímicos podem ser considerados como agentes que interferem no metabolismo respiratório das plantas.

5.3 Fotossíntese e processos relacionados

- **Efeito na fotossíntese:** O aumento da biomassa seca das plantas está ligado à fixação de carbono e, por conseguinte, a eficiência fotossintética. Einhellig (1986) estudou o efeito do aleloquímico escopoletina na taxa fotossintética líquida de várias espécies de plantas cultivadas em solução nutritiva. Verificou que a adição de 500 ou 1000 μM de escopoletina no meio de cultivo do tabaco (*Nicotiana tabacum*) reduziu a taxa fotossintética líquida a partir do segundo dia

e esta continuou a declinar por mais dois dias, ocorrendo uma lenta recuperação, após este período. Verificou também que a respiração não foi alterada e que a expansão da área foliar foi reduzida paralelamente à fotossíntese. Este aleloquímico também reduziu a taxa fotossintética do girassol (*Helianthus annuus*) e do caruru (*Amaranthus retroflexus*), portanto, com impacto sobre espécies, C₃ e C₄. Estudos mais recentes mostram que o sorgoleone, substância exsudada das raízes de sorgo, causa inibição da fotossíntese. Segundo [Gonzalez et al. \(1997\)](#) o sorgoleone provou ser um potente inibidor do transporte de elétrons no fotossistema II (FSII) em cloroplastos isolados e na membrana do FSII. Neste estudo o sorgoleone exibiu maior atividade específica do que o diuron, um dos herbicidas inibidores da fotossíntese mais conhecidos.

- **Resposta estomática:** [Einhellig \(1986\)](#) observou que na presença de escopoletina na solução nutritiva, plantas de várias espécies mostraram menor perda de turgor foliar e redução na taxa fotossintética, o que pode ter ocorrido devido ao fechamento estomático que limitou a disponibilidade de CO₂. Verificou também que a adição de 500 a 1000 μM de escopoletina e ácido clorogênico provocou o fechamento estomático em tabaco e girassol, com boa correlação entre o efeito da escopoletina na abertura estomática e taxa fotossintética. A relação entre a interferência do aleloquímico com a função estomática e a redução no crescimento, ainda não está bem esclarecida. [Einhellig \(1986\)](#) observou que os estômatos de tabaco fecharam com a aplicação de 1000 μM de ácido tânico, mas não foram afetados por 100 μM, que foi o limite mínimo de concentração do ácido que causou a redução do crescimento das plantas.
- **Conteúdo de clorofila:** Nos estudos com aleloquímicos, a clorose tem sido relacionada como um dos sintomas da interferência destas substâncias sobre as plantas. [Einhellig \(1986\)](#) verificou que seis dias após o tratamento de plantas de soja com os ácidos ferúlico, *p*-cumárico e vanílico, as plantas apresentavam menor peso seco e menos clorofila na folha do que as plantas do tratamento controle. Em contraste, plântulas de sorgo não apresentaram redução no conteúdo de clorofila nas folhas, apesar do crescimento das plântulas ter sido inibido. A perda de clorofila provavelmente contribuiu para uma menor taxa fotossintética, entretanto, os diferentes efeitos no conteúdo da clorofila de soja e sorgo mostram que é necessário ter cuidado para sugerir que o primeiro evento altera o crescimento das plantas. No caso da soja, o autor pressupõe que a redução da clorofila pode ter sido devida a um aumento na sua degradação ou a uma inibição da síntese de Mg-porfirina pelos aleloquímicos. [Inderjit \(1996\)](#) observou que compostos solúveis da planta daninha *Pluchea*

lanceolata influenciou o conteúdo de clorofila e a taxa fotossintética líquida das folhas de aspargo (*Asparagus officinalis*) sob condições de casa de vegetação.

5.4 Absorção de nutrientes e processos associados

- **Absorção de íons e conteúdo mineral:** Monitoramento da absorção de nutrientes por cortes de raízes tem mostrado que os ácidos benzóico e cinâmico, as hidroquinonas, juglona, naringenina e florretina são substâncias que interferem com o processo de absorção. Glass (1973) mostrou que os ácidos benzóico e cinâmico inibiram a absorção de PO_4^{3-} e K^+ pelas raízes de cevada. Harper & Balke (1981) mostraram que com a redução do pH do meio de 6,5 para 4,5, o ácido salicílico causou grande inibição na absorção de K^+ pelas raízes de aveia. Assim, sob determinadas condições os aleloquímicos podem inibir a absorção de nutrientes. Poucos estudos têm avaliado o efeito específico de aleloquímicos no conteúdo mineral de plantas intactas. Einhellig (1986) cita alguns trabalhos onde foi observado inibição na absorção de pelas plantas de soja em presença de ácido ferúlico. Este ácido quando aplicado em sorgo no limite de inibição de crescimento (250 e 500 μM) reduziu a concentração de PO_4^{3-} nas raízes e parte aérea e de K^+ e Mg^{2+} nas raízes.
- **Efeito nas membranas:** Os aleloquímicos interferem com a absorção de nutrientes, provavelmente devido a um efeito na membrana celular, como por exemplo, alterando a sua seletividade. Glass & Dunlop (1974) verificaram que a membrana das células de raiz de cevada foi rapidamente despolarizada pela adição de 500 μM do ácido salicílico em meio tampão (pH 7,2). O potencial mudou de -150 mV para próximo de zero em 12 minutos. Ácidos benzóico e cinâmico testados a 250 μM , também causaram despolarização. Igualmente, níveis micromolares dos ácidos benzóico e butírico causaram despolarização da membrana da célula de coleóptilo de aveia (Bates & Goldsmith, 1983). Explicação plausível para o decréscimo observado no potencial da membrana inclui a inibição da ATPase, a qual produz a diferença de potencial e a redução na energia disponível para seu funcionamento. Glass & Dunlop (1974) avaliaram o efeito de ácidos fenólicos em células de raízes de cevada e sugeriram que estes compostos causaram aumentos na permeabilidade da membrana para cátions e ânions, admitindo um efluxo não específico de íons.
- **Efeito na relação hídrica da planta:** De acordo com Einhellig (1986), os ácidos *p*-cumárico e ferúlico reduzem o potencial de água das folhas de sorgo e de plântulas de soja, sendo a diferença resultante

da redução do potencial osmótico e pressão de turgor das células. Aleloquímicos que reduzem o crescimento de plantas podem também ter parte dos seus efeitos relacionados com a interrupção do fluxo normal de água na planta. Segundo [Rice \(1984\)](#), os aleloquímicos podem interferir com o fluxo do xilema, pelo entupimento dos vasos, sugerindo assim, que parece provável uma interdependência entre balanço hídrico e efeitos dos aleloquímicos.

6. Fatores que Afetam a Intensidade dos Efeitos Alelopáticos

[Einhellig \(1996\)](#) ilustra na forma de um triângulo, as interações de fatores que influenciam a alelopatia ([Figura 3](#)). Este modelo mostra que a alelopatia resulta da ação combinada de vários fatores, não estando isolada dos fatores que alteram o crescimento das plantas.



Figura 3. Relação entre aleloquímicos e fatores ambientais influenciando o crescimento das plantas.

Muitos pesquisadores admitem que as plantas que sofrem estresses por fatores abióticos como temperatura, radiação, nutrientes e água e, ou, bióticos como doenças e pragas, durante o crescimento, aumentam a produção de metabólitos secundários ([Gershenzon, 1984](#); [Timmermann et al., 1984](#); [Einhellig, 1996](#); [Inderjit, 1996](#)). Estas mudanças metabólicas são importantes mecanismos de defesa da planta, induzindo a maior produção de aleloquímicos e conseqüentemente, alterando as estratégias de manejo da alelopatia nas culturas ([Einhellig, 1995, 1996](#)).

Estudos têm mostrado que os resultados dos bioensaios de crescimento de plântulas em presença de aleloquímicos, variam de acordo com as condições ambientais do local de instalação dos ensaios. Tem-se verificado que os aleloquímicos possuem maior efeito inibitório quando os bioensaios são conduzidos com temperaturas elevadas ([Steinsiek et al., 1982](#); [Qasem &](#)

Abu-Irmaileh, 1985; Fisher et al., 1994). De acordo com Einhellig & Eckrich (1984) foi necessário maior quantidade de ácido ferúlico para inibir o crescimento do sorgo a 29°C do que a 37°C. O mesmo foi verificado para a soja, em que 100 μ M de ácido ferúlico não afetou o crescimento das plantas a 23°C, mas inibiu a 34°C.

Qualidade e intensidade da luz e duração do período luminoso são também importantes fatores que regulam a síntese de aleloquímicos nas plantas. Plantas de tabaco expostas a luz vermelha no fim do dia produzem mais alcalóides mas menos ácidos fenólicos do que aquelas expostas a luz vermelho distante (Kasperbauer et al., 1970). Rice (1984) observou que dias longos aumentam a concentração de ácido fenólico e terpenos em muitas espécies de plantas.

Deficiência nutricional também pode influenciar a produção de aleloquímicos. Os compostos estudados mais detalhadamente são os fenólicos e a escopolina. Rice (1984) verificou que a deficiência de boro, cálcio, magnésio, nitrogênio, fósforo, potássio ou enxofre aumenta a concentração de ácido clorogênico e escopolina em muitas plantas.

Estresse hídrico, isolado ou em combinação com outros estresses, induz aumento substancial da concentração dos ácidos clorogênico e isoclorogênico nas plantas. Estudos realizados por Del Moral (1972) mostraram que em girassol, a combinação de estresse hídrico com deficiência de nitrogênio promoveu aumento de 15 vezes na concentração destes ácidos.

Os ácidos fenólicos estão sujeitos à degradação por microrganismos, polimerização, adsorção às partículas do solo e adsorção ou absorção pelas sementes e raízes. Outros fatores como pH, temperatura, nível de umidade e matéria orgânica também podem modificar a atividade e disponibilidade destas substâncias (Klein & Blum, 1990).

As interações entre substâncias alelopáticas e o solo dependem das características químicas das mesmas e das propriedades do solo (Chou & Waller, 1989). Os ácidos fenólicos presentes no solo estão sujeitos à retenção reversível ou irreversível pelas partículas orgânicas e, ou, inorgânicas (Dalton et al., 1987). No entanto, a retenção não é um processo simples, pois vários mecanismos de ligação podem estar envolvidos (Waller, 1987).

Okamura (1990), na tentativa de elucidar a retenção, verificou que numa mistura de vários ácidos fenólicos, cada um foi independentemente adsorvido em material amorfo (alofanas) por troca iônica, pontes de hidrogênio e, ou coordenação. No caso da haloisita e ilita, o ácido protocatéquico e o *p*-hidroxibenzóico foram retidos por pontes de hidrogênio nas intercadas dos minerais de argila e os outros compostos foram pouco adsorvidos, agindo como catalizadores.

A sorção-dessorção do ácido *p*-cumárico (ácido 4-hidroxicinâmico), do ácido ferúlico (ácido 3-metoxi-4-hidroxicinâmico), ácido verátrico (ácido 3,4-dimetoxibenzóico), ácido vanílico (ácido 3-metoxi-4-hidroxibenzóico) e ácido *p*-hidroxibenzóico (ácido 4-hidroxibenzóico) foi caracterizada em

solos com diferentes propriedades físico-químicas por [Cecchi et al. \(2004\)](#). Os ácidos fenólicos foram sorvidos rapidamente (<8 h) e em proporções elevadas em relação ao montante aplicado (média de 84%). A sorção foi irreversível. O pré-tratamento de solos para remover matéria orgânica e óxidos metálicos livres do solo diminuiu a sorção. A sorção dos ácidos *p*-cumárico e ferúlico foi correlacionada com o teor de argila do solo e a sorção de ácido verátrico foi correlacionada com diversos fatores do solo. Em contraste, nenhuma relação consistente entre as características do solo e a sorção de ácido vanílico e *p*-hidroxibenzóico foi encontrada. Com base nos resultados destes experimentos, ou seja, a alta reatividade dos ácidos fenólicos, é pouco provável que estes produtos químicos possam ser transportados para longe do seu ponto de origem, limitando o seu raio de influência. Parece que, para que estes ácidos fenólicos possam ter efeitos alelopáticos sobre plantas, eles teriam que persistir no solo por longos períodos, resultando em um acúmulo da substância química a níveis elevados o suficiente para que pudessem exercer efeitos alelopáticos, embora eles sejam fortemente adsorvidos em baixas concentrações.

Estudando o efeito alelopático de saponinas de raízes de alfafa (*Medicago media* PERS) e trevo vermelho (*Trifolium pratense* L.) sobre o crescimento de plântulas de trigo (*Triticum aestivum* L.), [Oleszek & Jurzysta \(1987\)](#) observaram que a inibição do crescimento de plântulas de trigo foi mais pronunciada em solos arenosos do que nos solos argilosos, o que foi atribuído à mais alta adsorção dos inibidores nos solos argilosos, com consequente redução das suas atividades.

Avaliando o efeito de resíduos de colza (*Brassica napus*), sorgo (*Sorghum bicolor*), ervilha (*Pisum sativum* L.) e trigo (*Triticum aestivum*), incorporados em solo arenoso e argiloso, sobre a germinação e o crescimento inicial do trigo, [Jessop & Stewart \(1983\)](#) observaram que cada resíduo provocou maior redução na germinação do trigo no solo arenoso e tanto o crescimento em altura como o comprimento do sistema radicular foram também menores neste solo.

[Bhowmik & Doll \(1982\)](#), avaliando o efeito de extratos aquosos de resíduos secos de algumas plantas daninhas sobre o desenvolvimento do milho em três tipos de solos, também verificaram que o efeito alelopático foi maior no solo mais arenoso. De acordo com [Einhellig & Leather \(1988\)](#), os efeitos alelopáticos são frequentemente mais severos em solos de textura arenosa. No entanto, em condições de excesso de umidade, os efeitos podem ser mais acentuados em solos mais argilosos.

Além da textura, o pH do solo e também das substâncias alelopáticas alteram a natureza das interações que ocorrem entre as moléculas dos aleloquímicos e do solo. Alguns trabalhos têm mostrado que a atividade dos ácidos é maior quando estes estão na forma não dissociada. Assim, já que uma diminuição do pH leva a um aumento relativo da fração não dissociada, o potencial de fitotoxicidade de um ácido aumenta muito com

o aumento da acidez do ambiente ao redor da célula ou raiz (Jalal & Read, 1983).

Blum et al. (1985), avaliando o efeito dos ácidos ferúlico e *p*-cumárico sobre a expansão foliar do pepino (*Cucumis sativus*) em solução nutritiva, observaram que a expansão da área foliar das plântulas foi inibida pelos dois ácidos e a magnitude destas inibições foi influenciada pela concentração dos ácidos e pelo pH, tendo sido maior a inibição em pH 5,5 do que a 6,3 e 7,0.

Dalton et al. (1983) observaram diferença na retenção do ácido ferúlico sob pH 5,0 e 7,9 em montmorilonita. Isto pode estar relacionado à saturação de Ca^{+2} , pois, em pH 7,9, o ácido ferúlico está na forma aniônica, podendo se ligar, por meio de uma ponte de cátion às partículas de argila, de modo que sua recuperação em solução é menor. A adsorção através de um íon trocável provocará a aproximação de moléculas orgânicas favorecendo a polimerização.

Whitehead et al. (1981), avaliando a influência do pH na liberação de compostos fenólicos do solo, raízes e palha, observaram que as quantidades de ácidos fenólicos extraídos aumentaram com a elevação do pH de 7,5 para 10,5, de forma que em maiores valores de pH, o efeito alelopático pode ser maior. Em valores de pH menores do que 7,5 as quantidades de compostos fenólicos extraídos foram extremamente baixas.

Em solo submetido ao plantio de trigo com e sem preparo convencional, e de soja com preparo convencional, o conteúdo de ácidos fenólicos das amostras de solo correlacionou-se positivamente com o conteúdo de carbono, nitrogênio, pH e conteúdo de água do solo (Blum et al., 1991). Além disto, em valores de pH mais altos, a solubilidade de ácidos fenólicos foi maior.

Conclui-se que tanto o efeito da textura como do pH na ocorrência de efeito alelopático não está ainda muito claro e, talvez, estes resultados contraditórios sejam devidos à interação da textura e do pH com outras propriedades e características dos solos.

7. Utilização da Alelopatia no Manejo de Plantas Daninhas nos Agroecossistemas

Um dos mais sérios problemas da agricultura moderna é a perda de produção das culturas causada pelas plantas daninhas, que a nível mundial, é estimada em 10% (Altieri & Liebman, 1988). Entretanto, estes dados são preliminares e baseados somente no impacto das plantas daninhas dominantes, não levando em conta o total de plantas daninhas que colonizam os campos cultivados.

Sob o ponto de vista da agricultura, o estudo da alelopatia assume destacada importância. O conhecimento detalhado das reações alelopáticas de plantas cultivadas e de invasoras, permitirá melhorar os sistemas agrícola-

las, por meio da implementação de técnicas tais como rotação de culturas, época e processos de semeadura mais adequados (Gomide, 1993).

Uma vez que os aleloquímicos são comuns nos vegetais e comprovadamente tóxicos para as plantas, mas de ação seletiva, admite-se a possibilidade de, conhecida a estrutura química do(s) componente(s) ativos(s) envolvido(s), se obter a partir destes produtos, herbicidas com as vantagens ecológicas dos produtos naturais. Diversos são os aleloquímicos que podem ser utilizados como herbicidas naturais, em substituição aos químicos, com destaque para os alcalóides, benzoxiazinonas, derivados do ácido cinâmico, coumarinas e compostos cianogênicos, pelo elevado potencial alelopático destes compostos (Putnam, 1988). Duke et al. (1988) relatam o uso do herbicida de origem natural cinmethylin, derivado de terpenóide biologicamente ativo encontrado em plantas do gênero *Artemisia* sp. A função desta substância inclui, principalmente, a inibição da germinação de sementes e do crescimento das plantas daninhas. Hatzios (1987) relata alguns produtos químicos sintetizados a partir de compostos naturais, que são comercializados para o controle de plantas daninhas (Tabela 1).

Tabela 1. Herbicidas derivados de compostos naturais. Fonte: Hatzios (1987).

Composto natural	Fonte (planta ou microrganismo)	Herbicida (nome comercial)	Fabricante/País
Anisomicina	<i>Streptomyces</i> sp.	Methoxyphenone	Nihon/Japão
Benzoxazinonas (ácido hidroxâmico)	Gramíneas	Banzanin	BASF/Alemanha
Bialafos	<i>Streptomyces hygroscopicus</i> e <i>Streptomyces viridochromogenes</i>	Herbiaceae	Japão
Cineole	Diversas plantas	Cinmethyline	Shell/EUA
Ácido fusárico	<i>Fusarium</i> sp.	Picloram	DOW/EUA
Iprexil	<i>Iprex pachyon</i>	Benzodox	Gulf/EUA
Moniliformina	<i>Fusarium moniliforme</i>	3,4-dibutoxy moniliformin	Ciba-Geigy/Suíça
Fosfotricina	<i>Streptomyces viridochromogenes</i>	Glufosinate	Hoechst/Alemanha
Ácido quinolínic	<i>Nicotina tabacum</i>	Quinlorac	BASF/Alemanha

7.1 Efeito alelopático das plantas daninhas

Existe um grande número de espécies de plantas daninhas com potencial alelopático (Tabelas 2 e 3). Estas plantas poderiam contribuir para o controle de outras plantas daninhas, por meio da produção de exsudatos, lixiviados e compostos voláteis.

Há evidências que algumas das mais agressivas plantas daninhas pe-renes mundialmente distribuídas, incluindo *Agropyron repens*, *Cirsium arvensis*, *Sorghum halepense* e *Cyperus esculentus*, apresentam influências alelopáticas, particularmente por meio da liberação de toxinas originadas de sua decomposição (Putnam, 1987). Tais influências, no entanto, podem afetar não somente as plantas daninhas, mas também as culturas por

Tabela 2. Métodos de superação dos principais mecanismos de dormência em sementes – Dicotiledôneas. Fonte: Kohli et al. (1998).

Planta daninha	Planta doadora	Cultura receptora	Efeito causado sobre as espécies receptoras
<i>Amaranthus palmeri</i> (caruru)		<i>Allium cepa</i> (cebola), <i>Daucus carota</i> (cenoura)	Resíduo da planta reduz o peso fresco e o crescimento das plântulas
<i>Amaranthus retroflexus</i> (caruru)		<i>Zea mays</i> (milho), <i>Glycine max</i> (soja)	Extrato aquoso inibe o crescimento do hipocótilo em soja e do coleóptilo em milho
<i>Alternanthera triandra</i> (carrapichinho)		<i>Glycine max</i> (soja), <i>Arachis hypogaea</i> (amendoim), <i>Phaseolus aureus</i> (feijão)	Reduz o crescimento da planta teste
<i>Ambrosia trifida</i> (losna-do-campo)		<i>Raphanus sativus</i> (rabanete), <i>Sorghum</i> sp. (sorgo)	Extrato aquoso inibe a germinação e reduz o crescimento das plântulas
<i>Bidens pilosa</i> (picão-preto)		<i>Lactuca sativa</i> (alface), <i>Phaseolus vulgaris</i> (feijão-comum), <i>Zea mays</i> (milho), <i>Sorghum bicolor</i> (sorgo)	Exsudato de raiz inibe o crescimento das plântulas
<i>Eupatorium odoratum</i> (cambará, mata-pasto)		<i>Euphorbia heterophylla</i> (amendoim-bravo), <i>Vigna unguiculata</i> (feijão-caupi)	Resíduos de caule, folhas e raízes retardam a germinação e reduzem a área foliar e a produção de matéria seca
<i>Parthenium hysterophorus</i> (losna-branca, fazendeiro)		<i>Phaseolus vulgaris</i> (feijão-comum), <i>Vigna sinensis</i> (feijão-caupi)	Folhas secas misturadas com o solo reduzem o crescimento e nodulação da planta
<i>Xanthium strumarium</i> (carrapichão)		<i>Brassica campestris</i> (nabo), <i>Lactuca sativa</i> (alface), <i>Pennisetum americanum</i> (milheto)	Extrato aquoso de diferentes partes da planta reduz a germinação, o crescimento e o peso seco das plantas-teste
<i>Chenopodium album</i> (ançarinha-branca)		<i>Glycine max</i> (soja), <i>Zea mays</i> (milho)	Extrato aquoso do resíduo inibe o crescimento da raiz e do coleóptilo
<i>Euphorbia hirta</i> (erva de Santa Luzia)		<i>Arachis hypogaea</i> (amendoim), <i>Glycine max</i> (soja), <i>Phaseolus aureus</i> (feijão)	Secreção da raiz afeta a germinação e o crescimento das plantas-teste
<i>Oxalis corniculata</i> (azedinha, trevo)		<i>Triticum aestivum</i> (trigo)	Extrato aquoso das folhas e tubérculos reduz o crescimento das plântulas
<i>Datura stramonium</i> (trombeteira)		<i>Hordeum vulgare</i> (cevada), <i>Triticum aestivum</i> (trigo)	Alcalóide que lixivia das sementes retarda o crescimento das plântulas
<i>Lantana camara</i> (cambará)		<i>Glycine max</i> (soja), <i>Zea mays</i> (milho)	Resíduo da parte aérea afeta o crescimento da parte aérea e das raízes das plantas-teste

Tabela 3. Métodos de superação dos principais mecanismos de dormência em sementes – Monocotiledôneas. Fonte: Kohli et al. (1998).

Planta doadora	daninha	Cultura receptora	Efeito causado sobre as espécies receptoras
<i>Agropyron</i>	<i>repens</i> (trigo silvestre)	<i>Avena sativa</i> (aveia), <i>Zea mays</i> (milho), <i>Glycine max</i> (soja), <i>Phaseolus vulgaris</i> (feijão-comum)	Extrato aquoso de rizomas ou de parte aérea retarda a germinação e reduz o crescimento da raiz
<i>Cyperus</i>	<i>esculentus</i> (tiriricão)	<i>Glycine max</i> (soja), <i>Zea mays</i> (milho)	Resíduo das plantas e extrato reduzem o peso seco das plantas-teste
<i>Cyperus</i>	<i>rotundus</i> (tiririca)	<i>Allium cepa</i> (cebola), <i>Lycopersicum esculentum</i> (tomate), <i>Raphanus sativus</i> (rabanete)	Extrato aquoso reduz a sobrevivência das plantas-teste
<i>Cynodon</i>	<i>dactylon</i> (grama-seda)	<i>Prunus persica</i> (pês-sego)	Crescimento de árvores recém plantadas é afetado
<i>Lolium</i>	<i>perenne</i> (azevém)	<i>Lactuca sativa</i> (alface)	Extrato da lavagem das sementes com água inibe fortemente a germinação e o crescimento das plântulas
<i>Setaria</i>	<i>glauca</i> (capim-rabo-de-raposa)	<i>Glycine max</i> (soja), <i>Zea mays</i> (milho)	Resíduo da planta reduz a altura, o crescimento e o peso fresco da parte aérea das plantas-teste
<i>Sorghum</i>	<i>halepense</i> (capim-massambará)	<i>Hordeum vulgare</i> (cevada)	Apodrecimento de plantas no solo inibe o crescimento de raízes e de parte aérea

meio do atraso ou impedimento da germinação das sementes, da redução do crescimento das plântulas e da influência no processo de simbiose das culturas.

Estudos realizados por Vidal et al. (1986) evidenciaram o potencial alelopático de extratos aquosos de raiz e parte aérea do capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) na germinação e desenvolvimento de plântulas de feijão, milho, soja, trigo, centeio, azevém, tremoço-azul e ervilhaca, sem, no entanto, caracterizar a(s) substância(s) envolvida(s). Deve ser salientado, que é difícil isolar alelopátia de outros mecanismos de interferência. Entretanto, com o desenvolvimento de novas técnicas, espera-se demonstrar o efeito alelopático de forma mais convincente.

7.2 Efeito alelopático das culturas

Várias culturas exibem forte alelopátia, principalmente no crescimento das culturas subsequentes. Muitos destes efeitos, tais como em *Triticum aesti-*

vum (trigo), *Oryza sativa* (arroz), *Zea mays* (milho), *Brassica* spp. (canola, couve) e *Secale cereale* (centeio), são atribuídos à decomposição do resíduo das folhas no campo após a colheita. O resíduo das culturas não só inibe o crescimento das plântulas de outras culturas, mas também da mesma espécie (Srivastava et al., 1986; Lodhi et al., 1987).

Extrato de resíduos de milho causa fitotoxicidade às próprias plântulas de milho, reduzindo o seu crescimento (Yakle & Cruse, 1984; Martin et al., 1990). Este efeito é consideravelmente reduzido utilizando-se a prática de rotação do milho com a soja (Turco et al., 1990). Jiménez et al. (1983), observaram que além do resíduo de milho, os grãos de pólen desta cultura também possuem propriedades alelopáticas.

Trigo, triticale, aveia, centeio, nabo, tremoço e colza apresentam efeito inibidor de germinação e desenvolvimento de capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*), capim-carrapicho (*Cenchrus echinatus*) e amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) (Almeida & Rodrigues, 1985).

As culturas que apresentam potencial alelopático (Tabela 4) devem ser bem manejadas com o objetivo de controlar plantas daninhas e reduzir o aparecimento de doenças, aumentando assim a produtividade das culturas.

8. Manejo de Plantas Daninhas na Agricultura

No Brasil estima-se uma perda média na produção anual da principais culturas em torno de 58,2% devido as plantas daninhas (Goellner, 1993). Como uma medida de controle, os agricultores têm dependido cada vez mais de herbicidas sintéticos, aumentando os custos de produção e o potencial de danos ao ambiente. Entretanto, a preocupação com os efeitos danosos dos agrotóxicos à saúde pública e a conscientização sobre a necessidade de proteção ambiental e utilização racional dos recursos naturais têm aumentado a demanda por agentes biologicamente renováveis, como os herbicidas naturais.

As plantas daninhas podem ser suprimidas por meio de plantas vivas ou de seus resíduos (Putnam & DeFrank, 1983). Kohli et al. (1998) sugerem três propostas pelas quais a alelopatia poderia ser manipulada no manejo de plantas daninhas:

1. Transferência de genes responsáveis pela síntese de aleloquímicos entre as culturas;
2. Uso de rotação de culturas, combinando culturas sucessoras capazes de reduzir a população de plantas daninhas por meio do seu potencial alelopático e;
3. Uso de aleloquímicos obtidos das plantas como herbicidas, sendo um método seguro e efetivo uma vez que são produtos naturais biodegradáveis e não persistem no solo como poluentes.

Tabela 4. Culturas com propriedades alelopáticas. Fonte: Kohli et al. (1998).

Cultura doadora	Cultura receptora	Efeito causado sobre as espécies receptoras
<i>Helianthus annuus</i> (girassol)	<i>Glycine max</i> (soja), <i>Sorghum</i> spp. (sorgo)	Folhas secas quando misturadas ao solo inibem a germinação e reduzem o crescimento das plântulas
<i>Helianthus annuus</i> (girassol)	<i>Triticum aestivum</i> (trigo)	Resíduos da cultura de girassol no campo, reduzem de 4 a 33% a germinação de sementes de trigo
<i>Brassica campestris</i> (nabo)	<i>Vigna radiata</i> (feijão-mungo-verde)	Extrato aquoso de resíduos inibe a germinação e reduz o crescimento das plântulas
<i>Raphanus sativus</i> (rabanete)	<i>Lactuca sativa</i> (alface)	Resíduo de raízes ou de parte aérea inibe a germinação
<i>Ipomoea batatas</i> (batata-doce)	<i>Cyperus esculentus</i> (tirikão), <i>Medicago sativa</i> (alfafa)	Extrato aquoso e metanólico retardam a germinação e reduzem a matéria seca das plantas
<i>Glycine max</i> (soja)	<i>Brassica rapa</i> (mostarda), <i>Medicago sativa</i> (alfafa), <i>Raphanus sativus</i> (rabanete), <i>Zea mays</i> (milho)	Extrato aquoso inibe a germinação das quatro espécies e o crescimento inicial das plantas de milho
<i>Lupinus albus</i> (trevoço)	<i>Amaranthus retroflexus</i> (caruru), <i>Chenopodium album</i> (ançarinhabranca)	Exsudatos radiculares reduzem o crescimento e aumentam a atividade enzimática da catalase e peroxidase
<i>Medicago sativa</i> (alfafa)	<i>Triticum</i> spp. (trigo)	Extratos aquoso e alcóolico reduzem a germinação e crescimento das plântulas
<i>Medicago sativa</i> (alfafa)	<i>Cucumis sativus</i> (pepino)	Resíduos da planta inibem germinação e crescimento das plântulas
<i>Trifolium alexandrinum</i> (trevo)	<i>Allium cepa</i> (cebola), <i>Daucus carota</i> (cenoura), <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate)	Compostos voláteis originários do resíduo das plantas, reduzem a germinação e o crescimento das plantas
<i>Coffea arabica</i> (café)	<i>Lactuca sativa</i> (alface), <i>Lolium multiflorum</i> (azevém)	Extratos aquosos de folhas secas e raízes reduzem a germinação e o crescimento da radícula
<i>Sorghum bicolor</i> (sorgo)	<i>Triticum aestivum</i> (trigo)	Resíduo da cultura de sorgo no campo, reduz de 10 a 31% a germinação
<i>Triticum aestivum</i> (trigo)	<i>Gossypium hirsutum</i> (algodão)	Resíduo da cultura reduz a germinação e a matéria seca das plantas

Referências

- Almeida, F.S., A alelopatia e as plantas. Circular 53, Instituto Agronômico do Paraná, Londrina, PR, 1988. 60 p.
- Almeida, F.S., Alelopatia: a defesa das plantas. *Ciência Hoje*, 11:38-45, 1990.
- Almeida, F.S. & Rodrigues, B.N., Plantio direto. In: Almeida, F.S. & Rodrigues, B.N., (Eds.). *Guia de Herbicidas: contribuição para o uso adequado em plantio direto e convencional*. Londrina, PR: Instituto Agronômico do Paraná, 1985. p. 341-399.
- Altieri, A.M. & Liebman, M., *Weed management in agroecosystems: ecological approaches*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1988. 354 p.
- Bates, G.W. & Goldsmith, M.H.M., Rapid response of the plasma-membrane potential in oat coleoptiles to auxin and other weak acids. *Planta*, 159:231-237, 1983.
- Bhowmik, P.C. & Doll, J.D., Corn and soybean response to allelopathic effects of weed and crop residues. *Agron J*, 74:4-6, 1982.
- Blum, U.; Dalton, B.R. & Shann, J.R., Effects of ferulic and *p*-coumaric acids in nutrient culture of cucumber leaf expansion as influenced by pH. *J Chem Ecol*, 15:1567-1582, 1985.
- Blum, U. & Rebeck, J., Inhibition and recovery of cucumber roots given multiple treatments of ferulic acid in nutrient culture. *J Chem Ecol*, 15:917-928, 1989.
- Blum, U.; Wentworth, T.R.; Klein, K.; Worsham, A.D.; King, L.D.; Gerig, T.M. & Lyu, S.W., Phenolic acid content in soil from wheat- no till, wheat-conventional till, and fallow-conventional till soybean cropping systems. *J Chem Ecol*, 17:1045-1067, 1991.
- Cecchi, A.M.; Koskinen, W.C.; Cheng, H.H. & Haider, K., Sorption-desorption of phenolic acids as affected by soil properties. *Biol Fertil Soils*, 39:235-242, 2004.
- Chou, C.H. & Kuo, Y.L., Allelopathic research of subtropical vegetation in Taiwan III: Allelopathic exclusion of understory by *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. *J Chem Ecol*, 12:1431-1448, 1986.
- Chou, C.H. & Waller, G.R., Phytochemical Ecology: allelochemicals, mycotoxins and insect pheromones and allomones. Monograph Series, Institute of Botany, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 1989. 504 p.
- Colton, C.E. & Einhellig, F.A., Allelopathic mechanisms of velvetleaf (*Abutilon theophrastic* Medic., Malvaceae) on soybean. *Am J Bot*, 67:1407-1413, 1980.
- Corcoran, M.R.; Geissman, T.A. & Phinny, B.O., Tannins as gibberellin antagonists. *Plant Physiol*, 49:323-330, 1972.

- Dalton, B.R.; Blum, U. & Weed, S.B., Allelopathic substances in ecosystems: effectiveness of sterile soil components in altering recovery of ferulic acid. *J Chem Ecol*, 9:1185–1201, 1983.
- Dalton, B.R.; Weed, S.B. & Blum, U., Plant phenolic acids in soils: a comparison of extraction procedures. *Soil Sci Soc Am J*, 51:1515–1521, 1987.
- Del Moral, R., On the variability of chlorogenic acid concentration. *Oecologia*, 9:289–300, 1972.
- Dey, P.M. & Harbone, J.B., *Methods in Plant Biochemistry*. London, UK: Academic Press, 1990. 657 p.
- Duke, S.O.; Paul Jr., R.N. & Lee, S.M., Terpenoids from the genus *Artemisia* as potential pesticides. In: Cutler, H.G., (Ed.). *Biologically Active Natural Products: potential use in agriculture*. Washington, EUA: American Chemical Society, 1988. p. 318–334.
- Einhellig, F.A., Mechanisms and modes of action of allelochemicals. In: Putnam, A.R. & Tang, C.S., (Eds.). *The Science of Allelopathy*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1986. p. 171–188.
- Einhellig, F.A., Allelopathy: current status and future goals. In: Inderjit, ; Dakshini, K.M.M. & Einhellig, F.A., (Eds.). *Allelopathy: Organisms, Processes, and Application*. Washington, EUA: American Chemical Society, 1995. p. 1–24.
- Einhellig, F.A., Interaction involving allelopathy in cropping systems. *Agron J*, 88:886–893, 1996.
- Einhellig, F.A. & Eckrich, P., Interactions of temperature and ferulic acid stress on grain sorghum and soybeans. *J Chem Ecol*, 10:161–170, 1984.
- Einhellig, F.A. & Leather, G.R., Potentials for exploiting allelopathy to enhance crop production. *J Chem Ecol*, 14:1829–1844, 1988.
- Feuch, W. & Schmid, P.P.S., Effect of ortho-dihydroxyphenols on growth and protein pattern of callus cultures from *Prunus avium*. *Physiol Plant*, 50:309–313, 1980.
- Fisher, N.H.; Williamson, G.B.; Weidenhamer, J.D. & Richardson, D.R., In search of allelopathy in the Florida Scrub. The role of terpenoids. *J Chem Ecol*, 20:1355–1380, 1994.
- Fuerst, E.P. & Putnam, A.R., Separating the competitive and allelopathic components of interference: theoretical principles. *J Chem Ecol*, 9:937–944, 1983.
- Gershenson, J., Changes in the levels of plant secondary metabolites under water and nutrient stress. *Rec Adv Phytochem*, 18:273–321, 1984.
- Glass, A.D.M., Influence of phenolic acids upon ion uptake. I: Inhibition of phosphate uptake. *Plant Physiol*, 51:1037–1041, 1973.

- Glass, A.D.M. & Dunlop, J., Influence of phenolic acids upon ion uptake. IV: Depolarization of membrane potentials. *Plant Physiol*, 54:855–858, 1974.
- Goellner, C.I., *Utilização dos Defensivos Agrícolas no Brasil: análise do seu impacto sobre o ambiente e a saúde humana*. 2a edição. Passo Fundo, RS: Artgraph Editora, 1993. 103 p.
- Gomide, M.B., *Potencialidades alelopáticas dos restos culturais de dois cultivares de cana-de-açúcar (Saccharum sp), no controle de algumas plantas daninhas*. Tese – Doutorado em Fitotecnia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1993.
- Gonzalez, V.M.; Kazimir, J.; Nimbai, C.I.; Weston, L.A. & Cheinae, G.M., Inhibition of a photosystem ii electron transfer reaction by the natural product sorgoleone. *J Agric Food Chem*, 45:1415–1421, 1997.
- Harper, J.R. & Balke, N.E., Characterization of the inhibition of K⁺ absorption in oat roots by salicylic acid. *Plant Physiol*, 68:1349–1355, 1981.
- Hatzios, K.K., Biotechnology applications in weed management: now and in the future. *Adv Agron*, 41:325–375, 1987.
- Inderjit, , Plant phenolics in allelopathy. *Bot Rev*, 62:186–202, 1996.
- Inderjit, & Dakshini, K.M.M., On laboratory bioassays in allelopathy. *Bot Rev*, 61:28–44, 1995.
- Jain, A. & Srivastava, H.S., Effect of salicylic acid on nitrate reductase activity in maize seedlings. *Physiol Plant*, 51:339–342, 1981.
- Jalal, M.A.F. & Read, D.J., The organic acid decomposition of Calluna heathland soil with special reference to phyto- and fungitoxicity. II. Monthly quantitative determination of the organic acid content of Calluna and spruce-dominated soil. *Plant Soil*, 70:273–286, 1983.
- Jessop, R.S. & Stewart, L.W., Effects of crop residues, soil type and temperature on emergence and early growth of wheat. *Plant Soil*, 74:101–109, 1983.
- Jiménez, J.J.; Schultz, K.; Anaya, A.L.; Hernández, J. & Espejo, O., Allelopathy potential of corn pollen. *J Chem Ecol*, 9:1011–1025, 1983.
- Kanchan, S.D. & Jayachandran, K.S., Allelopathic effects of *Parthenium hysterophorus* L. I. Exudation of inhibitors through roots. *Plant Soil*, 53:27–35, 1979.
- Kasperbauer, M.J.; Tso, T.C. & Sorokin, T.P., Effects of end-of-day red and far-red radiation on free sugars, organic acids and aminoacids of tobacco. *Phytochem*, 9:2091–2095, 1970.
- Klein, K. & Blum, U., Effects of soil nitrogen level on ferulic acid inhibition of cucumber leaf expansion. *J Chem Ecol*, 16:1371–1383, 1990.

- Kohli, R.K.; Batish, D. & Singh, H.P., Allelopathy and its implications in agroecosystems. *J Crop Prod*, 1:169–201, 1998.
- Leather, G.R. & Einhellig, F.A., Bioassays in the study of allelopathy. In: Putnan, A.R. & Tang, C.S., (Eds.). *The Science of Allelopathy*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1986. p. 133–145.
- Lee, T.T.; Starratt, A.N. & Jevnikar, J.J., Regulation of enzymic oxidation of indole-3-acetic acid by phenols: structure-activity relationship. *Phytochem*, 21:517–523, 1982.
- Lodhi, M.A.K.; Bilal, R. & Malik, K.A., Allelopathy in agroecosystems: wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *J Chem Ecol*, 13:1881–1891, 1987.
- Lovett, J.V., Allelopathic and self-defence in plants. *Aust Weeds*, 2:33–36, 1982.
- Lyu, S.W. & Blum, U., Effect of ferulic acid, an allelopathic compound, on net P, K, and water uptake in cucumber seedling in a split-root system. *J Chem Ecol*, 16:2429–2439, 1990.
- Martin, V.L.; McCoy, E.L. & Dick, W.A., Allelopathy of crop residues influences corn seed germination and early growth. *Agron, J*, 82:555–560, 1990.
- Medeiros, A.R.M., *Determinação de potencialidades aleopáticas em agroecossistemas*. Tese – Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1989.
- Miller, D.A., Allelopathy in forage crop systems. *Agron J*, 88:854–859, 1996.
- Muller, C.H., The role of chemical inhibition (allelopathy) in vegetational composition. *B Torrey Bot Club*, 93:332–351, 1966.
- Muller, C.H., Allelopathy as a factor in ecological processes. *Vegetatio*, 18:348–357, 1969.
- Muller, W.H., Volatile materials produced by *Salvia leucophylla*: effects on seedling growth and soil bacteria. *Bot Gaz*, 126:195, 1965.
- Okamura, Y., Consecutive adsorption of salicylic acid and its structural analogues on allophanic clay. *Clay Sci*, 7:325–335, 1990.
- Oleszek, W. & Jurzysta, M., The allelopathic potential of alfalfa root medicagenic acid glycosides and their fate in soil environments. *Plant Soil*, 98:67–80, 1987.
- Patrick, Z.A., Phytotoxic substance associated with the decomposition in soil of plant residues. *Soil Sci*, 111:13–18, 1971.
- Prates, H.T.; Pereira Filho, I.A.; Paes, J.M.V.; Pires, N.M. & Magalhães, P.C., Efeito da parte aérea da leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam) De Wit) sobre o desenvolvimento das plantas daninhas e do milho.

- Pesquisa em Andamento, EMBRAPA-CNPMS, Sete Lagoas, 1999a. 2 p.
- Prates, H.T.; Pires, N.M.; Filho, I.A.P. & Farias, T.C.L., Effect of leucaena (*Leucaena leucocephala* (Lam) De Wit) over the weed population on maize (*Zea mays* L.) crop. In: Abstracts of International Conference on Biodiversity. Belo Horizonte, MG: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), p. 216. 1999b.
- Putnam, A.R., Weed allelopathy. In: Duke, S.O., (Ed.). *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1987. p. 131-155.
- Putnam, A.R., Allelochemicals from plants as herbicides. *Weed Technol*, 2:510-518, 1988.
- Putnam, A.R. & DeFrank, J., Use of phytotoxic plant residues for selective weed control. *Crop Protection*, 2:173-181, 1983.
- Putnam, A.R. & Duke, W.B., Biological suppression of weeds. evidence for allelopathy in accessions of cucumber. *Science*, 185:370-372, 1974.
- Putnam, A.R. & Duke, W.B., Allelopathy in agroecosystems. *Ann Rev Phytopathol*, 16:431-451, 1978.
- Qasem, J.R. & Abu-Irmaileh, B.E., Allelopathic effect of *Salvia syriaca* L. (Syrian sage) in wheat. *Weed Res*, 25:47-52, 1985.
- Rice, E.L., *Allelopathy*. 2a edição. New York, EUA: Academic Press, 1984. 422 p.
- Rodrigues, L.R.A.; Rodrigues, T.J.D. & Reis, R.A., Alelopatia em Plantas Forrageiras. Boletim, UNESP/FUNEP, Jaboticabal, SP, 1992. 18 p.
- Santelmann, P.W., Herbicide bioassay. In: Truelove, B., (Ed.). *Research Methods in Weed Science*. Las Cruces, EUA: Southern Weed Science Society, 2a edição, 1977. p. 79-87.
- Schumacher, W.J.; Thill, D.C. & Lee, G.A., Allelopathic potential of wild oat (*Avena fatua*) on spring wheat (*Triticum aestivum*) growth. *J Chem Ecol*, 9:1235-1245, 1983.
- Seigler, D.S., Chemistry and mechanisms of allelopathic interaction. *Agron J*, 88:876-885, 1996.
- Shilling, D.G. & Yoshikawa, F.A., A rapid seedling bioassay for study of allelopathy. In: Waller, G.R., (Ed.). *Allelochemicals: Role in Agriculture and Forestry*. Washington, EUA: American Chemical Society, 1987. p. 334-342.
- Siqueira, J.O.; Nair, M.G.; Hammerschmidt, R.; Safir, G.R. & Putnam, A.R., Significance of phenolic compounds in plant-soil-microbial systems. *Crit Rev Pl Sci*, 10:63-121, 1991.
- Srivastava, P.C.; Totey, N.G. & Prakash, O., Effect of straw extract on water absorption and germination of wheat (*Triticum aestivum* L. variety RR-21) seeds. *Plant Soil*, 91:143-145, 1986.

- Steinsiek, J.W.; Oliver, L.R. & Collins, F.C., Allelopathic potential of wheat (*Triticum aestivum*) straw on selected weed species. *Weed Sci*, 30:495-497, 1982.
- Stenlid, G., Flavonoids as inhibitors of formation of adenosine triphosphate in plant mitochondria. *Phytochem*, 9:2251-2256, 1970.
- Streibig, J.C., Herbicide bioassay. *Weed Res*, 28:479-484, 1988.
- Swain, T., Secondary compounds as protective agents. *Rev Plant Physiol*, 28:479-501, 1977.
- Szczepanski, A.J., Allelopathy as a means of biological control of water weeds. *Aquatic Bot*, 3:193-197, 1977.
- Tang, C.S. & Young, C.C., Collection and identification of allelopathic compounds from the undisturbed root system of bigalga limpograss (*Hemarthria altissima*). *Plant Physiol*, 69:155-160, 1982.
- Timmermann, B.N.; Steelink, C. & Loewus, F.A., *Phytochemical Adaptations to Stress*. v. 18 de *Recent Advances in Phytochemistry*. New York, EUA: Springer, 1984. 334 p.
- Turco, R.F.; Bischoff, M.; Breakwell, D.P. & Griffith, D.R., Contribution of soil-borne bacteria to the rotation effect of corn. *Plant Soil*, 122:115-120, 1990.
- Van Sumere, C.F.; Cottenie, J.; DeGreef, J. & Kint, J., Biochemical studies in relation to the possible germination regulatory role of naturally occurring coumarin and phenolics. *Recent Adv Phytochem*, 4:165-170, 971.
- Vidal, R.A.; Almeida, F.S. & Mizokami, M.M., Efeito alelopático de extratos de capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) no crescimento inicial de algumas culturas. In: Resumos do 16º Congresso Brasileiro de Herbicidas e Plantas Daninhas. Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Herbicidas e Ervas Daninhas, p. 6. 1986.
- Waller, G.R., *Allelochemicals: role in agriculture and forestry*. v. 330. American Chemical Society, 1987.
- Whitehead, D.C.; Dibb, H. & Hartley, R.D., Extractant pH and the release of phenolic compounds from soil, plant roots, and leaf litter. *Soil Biol Biochem*, 13:343-348, 1981.
- Whittaker, R.H., The biochemical ecology of higher plants. In: Sondeheimer, E. & Simeone, J.B., (Eds.). *Chemical Ecology*. New York, EUA: Academic Press, 1970. p. 43-70.
- Whittaker, R.H. & Feeny, P.P., Allelochemicals: chemical interactions among plants. *Science*, 171:757-770, 1971.
- Williamson, G.B., Allelopathy, Koch's postulates and the neck riddle. In: Grace, J.B. & Tilman, D., (Eds.). *Perspectives on Plant Competition*. New York, EUA: Academic Press, 1990. p. 143-162.

- Yakle, G.A. & Cruse, R.M., Effects of fresh and decomposing corn plant residue extracts on corn seedling development. *Soil Sci Soc Am J*, 48:1143–1146, 1984.
- Yu, J.Q. & Matsui, Y., Effects of root exudates of cucumber (*Cucumis sativus*) and allelochemicals on ion uptake by cucumber seedlings. *J Chem Ecol*, 23:817–827, 1997.

Introdução ao Controle Químico

Rubem Silvério de Oliveira Jr.

1. Breve Histórico do Controle Químico de Plantas Daninhas

Os herbicidas são substâncias químicas capazes de selecionar populações de plantas. O termo “seleção” se refere à atuação destes produtos, provocando a morte de certas plantas e de outras não. De acordo com Zimdhal (1993), a etimologia da palavra vem do latim *Herba* (planta) e *caedere* (matar).

Em muitos aspectos, a história da Ciência das Plantas Daninhas confunde-se com a história do controle das plantas daninhas. Após a fase histórica em que o controle era feito manualmente ou com auxílio de ferramentas, surgem, no início do século XX, os primeiros relatos da utilização de substâncias químicas para o manejo de plantas daninhas. Por volta de 1908, pesquisadores como Bolley (North Dakota, EUA), Bonnet (França) e Schulz (Alemanha) usaram sais de cobre e depois ácido sulfúrico para o controle de plantas daninhas em cereais (Zimdhal, 1993).

O primeiro marco relevante relacionado ao controle químico moderno ocorreu, no entanto, em 1941, com a síntese do ácido 2,4-diclorofenoxiacético, o 2,4-D (Pokorny, 1941). Durante a segunda guerra mundial foram descobertas as propriedades dos derivados dos ácidos fenoxiacéticos sobre o crescimento de plantas. No entanto, apenas após o fim da guerra foi feito o anúncio público da ação do 2,4-D como herbicida que causava morte diferenciada de plantas (Hammer & Tukey, 1944; Marth & Mitchell, 1944). Posteriormente, foi descrito o primeiro herbicida (monuron) que não era derivado dos ácidos fenólicos (Bucha & Todd, 1954). Nas décadas de 50 e 60, as práticas modernas de baixas doses de herbicidas orgânicos sintéticos para o controle seletivo de plantas daninhas.

O surgimento, nos Estados Unidos, da primeira sociedade científica (Weed Science Society of America¹, em 1956) consolidou o estudo das plantas daninhas como ciência, repercutindo na criação de outros grupos de estudo em diferentes países do mundo. No Brasil, em 1963 é criada a Sociedade Brasileira de Herbicidas e Ervas Daninhas (SBHED), atual Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas (SBCPD)².

¹ <http://www.wssa.net/>

² <http://www.sbcpd.org/>

2. Importância Econômica

O mercado de pesticidas no Brasil tem evoluído rapidamente, tanto pela agregação de novas áreas produtivas, como os cerrados, quanto pelo aumento de tecnificação e pela redução da dependência de mão-de-obra.

Embora não existam dados disponíveis para todos os anos, sabe-se que nos últimos 45 anos o volume de negócios com pesticidas no Brasil passou de US\$ 400 mil em 1964 para quase US\$ 7 bilhões em 2008 (Figura 1). No período de 1999 a 2007, o volume de vendas no Brasil cresceu numa taxa anual de 4,67%. Para efeito de comparação, os segmentos específicos relacionados aos mercados de herbicidas, fungicidas e inseticidas cresceram em taxas anuais de 5,25; 2,34 e 4,92%, respectivamente, no mesmo período. Historicamente, o volume de vendas do mercado de herbicidas sempre representou a maior fração do mercado de pesticidas, tanto no Brasil, como em nível mundial. Embora respondesse por mais da metade do mercado até a década passada, representa atualmente de 40 a 45% do total de vendas do mercado de pesticidas (Tabela 1).

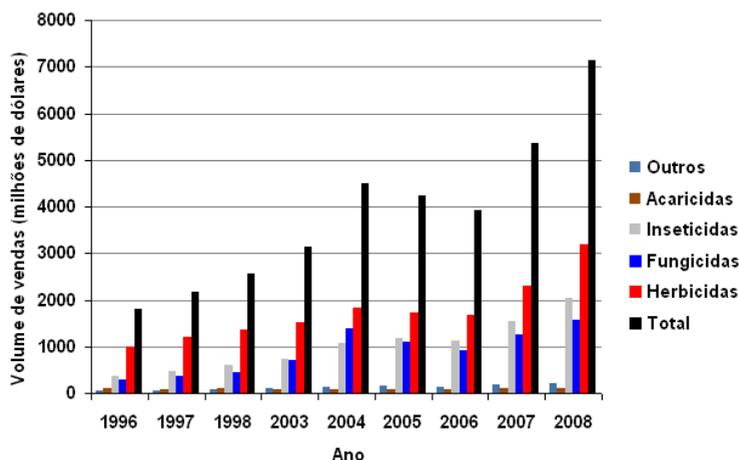


Figura 1. Evolução do mercado de vendas de pesticidas (total e relacionado apenas a herbicidas) no Brasil. Fonte: Extraído de várias tabelas do SINDAG.

No mercado brasileiro, a soja destaca-se como a atividade agrícola com maior participação no mercado de pesticidas, seguida pelo milho, citros, cana-de-açúcar e algodão, o que apresenta uma correlação intrínseca com a área de cultivo destas espécies anualmente no país. Estas quatro atividades em conjunto representam quase 75% do mercado brasileiro de pesticidas (Tabela 2).

Tabela 1. Volume de vendas do mercado de pesticidas no Brasil 1996-2008 (em milhões de dólares). Fonte: Extraído de várias tabelas do SINDAG.

Classe	1996	1997	1998	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Herbicidas	1005,1	1214,8	1368,7	1523,7	1830,7	1735,8	1674,3	2304,1	3200,7
Fungicidas	276,3	356,3	436,2	713,5	1388,2	1089,5	917,4	1264,4	1573,6
Inseticidas	375,5	464,8	589,5	725,2	1066,6	1180,7	1128,9	1537,4	2027,8
Acaricidas	92,2	86,7	97,8	80,0	78,0	82,8	70,4	92,1	112,9
Outros*	43,4	58,2	65,6	93,8	131,5	155,0	128,8	174,0	174,0
Total	1712,7	2180,8	2557,8	3163,3	4494,9	4234,7	3919,8	5372,0	7125,1

* Antibrotantes, reguladores de crescimento, óleo mineral e espalhantes adesivos.

Tabela 2. Participação relativa (%) de diferentes culturas no volume total de vendas de pesticidas no Brasil (2003-2007). Fonte: Extraído de várias tabelas do SINDAG.

Culturas	Participação (%) no mercado de pesticidas				
	2003	2004	2005	2006	2007
Soja	41,6	45,0	44,0	40,9	43,0
Milho	13,9	12,5	12,3	11,7	13,6
Citros	9,2	8,1	8,2	10,4	8,7
Cana	7,5	7,2	7,1	9,6	9,4
Algodão	6,5	7,0	6,3	7,0	6,5
Café	3,4	3,3	3,6	3,9	2,7
Trigo	2,3	3,0	2,2	1,9	1,6
Batata	2,2	1,9	1,9	2,0	1,4
Arroz irrigado	2,1	1,9	1,7	1,5	1,8
Feijão	2,0	1,9	1,6	1,7	1,8
Outras	9,3	8,2	11,1	9,4	9,3

3. Aspectos Positivos do Controle Químico

O uso de herbicidas pode prevenir a interferência das plantas daninhas principalmente no início do ciclo, período durante o qual normalmente são causadas as maiores perdas nas culturas. É um aspecto importante quando na população de plantas daninhas presentes são encontradas espécies de difícil controle após a emergência, ou quando as plantas daninhas são indesejáveis durante todo o ciclo da cultura, como no caso de áreas destinadas à produção de sementes. Além disto, o uso de herbicidas proporciona um controle mais efetivo nas linhas de plantio, onde muitas vezes outros métodos de controle não têm a mesma eficiência.

A flexibilidade quanto à época de aplicação, principalmente em áreas de grande extensão, também é um fator importante, pois o controle das plantas daninhas pode ser feito em etapas, adequando a demanda de trabalho ao maquinário, implementos e mão-de-obra disponíveis. Em muitas

situações, há alternativas de tratamentos desde aqueles incorporados ao solo antes do plantio até aqueles aplicados em pós-emergência da cultura, diminuindo a concentração na demanda por equipamentos. Além disto, alguns métodos de controle mecânico são de uso limitado em épocas de precipitações frequentes.

A redução do tráfego de máquinas e de cultivos mecânicos pode proporcionar uma vantagem no caso de solos susceptíveis à erosão, assim como em locais onde é importante a preservação da integridade do sistema radicular de culturas perenes, como no caso de café e citros. Utilizado adequadamente, o controle químico pode resultar não só em uma redução substancial do tráfego pesado nas áreas de cultivo como também na formação de cobertura morta para proteção do solo, como mostrado nas Figuras 2(a) e 2(b).

O controle químico de plantas daninhas apresenta rendimento operacional elevado, além de demandar pequena quantidade de mão-de-obra quando comparado a outros métodos de controle. O uso de herbicidas também proporciona economia de trabalho e energia pela redução dos custos de colheita e de secagem de grãos, em função da eliminação das plantas daninhas.

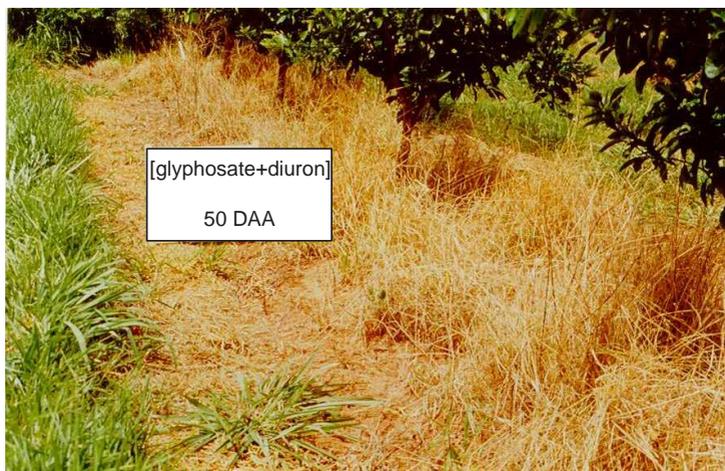
No entanto, como qualquer outra técnica, a utilização de herbicidas para o controle de plantas daninhas apresenta também limitações.

4. Limitações do Uso de Herbicidas

Todos os pesticidas possuem certo grau de toxicidade para o homem e para outras espécies de plantas e animais. Embora a tendência atual seja de que os novos herbicidas lançados no mercado apresentem um menor grau de toxicidade, ainda existem preocupações com relação aos casos de intoxicação registrados em aplicadores e manipuladores de caldas de pesticidas.

A utilização de herbicidas demanda equipamento adequado de aplicação e proteção, além de operador treinado. Na maioria dos casos, as intoxicações ocorrem pela negligência no uso de equipamento individual de proteção, da mesma forma que o sucesso de muitas aplicações pode ser limitado pela utilização inadequada do equipamento.

Problemas associados ao comportamento ambiental destes compostos também existem. No Paraná, por exemplo, diversos municípios têm restringido o uso do herbicida 2,4-D em função dos problemas causados pela deriva deste produto para áreas vizinhas a sua aplicação, causando problemas em áreas de cultivo de olerícolas, frutíferas (principalmente uva, citros e amoreira), algodão e mandioca (Tabela 3). A susceptibilidade das culturas varia com o estágio de desenvolvimento. No caso do tomate, por exemplo, a simulação de deriva por meio da aplicação de sub-doses de 2,4-D tem sido investigada em várias culturas. Doses até 13,44 g e.a. ha⁻¹



(a)



(b)

Figura 2. Aspecto visual de lavoura de citros, conduzida em solo arenoso na região do arenito Caiuá (PR). (a): 50 dias após a aplicação (DAA) de glyphosate+diuron nas linhas de plantio (à esquerda área não tratada nas entrelinhas). (b): 120 DAA do mesmo herbicida (à direita o controle neste período foi feito por duas roçadas). Observa-se, em ambos os casos, a formação de camada de cobertura morta protegendo o solo. Fonte:

[Oliveira Jr. et al. \(1995\)](#).

Tabela 3. Municípios da região de Campo Mourão, PR, nos quais existem restrições de utilização do 2,4-D durante algum período do ano.

Município	Período de restrição	Município	Período de restrição
Araruna	ano todo	Mamborê	agosto-maio
Ariranha do Ivaí	setembro-fevereiro	Mato Rico	setembro-fevereiro
Boa Esperança	15/ago.-15/maio	Moreira Sales	agosto-maio
Corumbatã do Sul	setembro-março	Nova Cantu	setembro-fevereiro
Engenheiro Beltrão	agosto-março	Peabiru	agosto-abril
Farol	setembro-fevereiro	Quinta do Sol	outubro-abril
Fênix	ano todo	Roncador	ano todo
Janiópolis	ano todo	São João do Ivaí	20/set.-20/maio
Jardim Alegre	ano todo	São Pedro do Iguaçu	setembro-fevereiro
Luiziana	agosto-março		

não causaram nenhum efeito na produção quando aplicadas após a formação do quarto cacho de frutos. Por outro lado, doses tão baixas quanto 0,42 g e.a. ha⁻¹ são capazes de afetar significativamente a produtividade de frutos quando aplicadas no início do florescimento das plantas (Fagliari et al., 2005).

Aplicações realizadas no início do florescimento do primeiro ramo do algodão demonstraram que esta espécie é sensível à deriva de 2,4-D nesta fase (F1) e, que, neste estágio, tolera no máximo 3,36 g e.a. ha⁻¹ (equivalente a uma deriva simulada de 0,5% de uma aplicação de uma dose de 1,0 L p.c. ha⁻¹). Num segundo experimento conduzido na região de Maringá, PR, no qual as simulações de deriva foram realizadas em diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, observou-se que a partir do momento em que as maçãs começam a se formar, a sensibilidade da cultura cai substancialmente. O único tratamento que provocou queda significativa de produtividade neste segundo experimento foi a dose de 13,44 g e.a. ha⁻¹ (equivalente a uma deriva simulada de 2,0%) aplicada no estágio C1 (abertura da primeira maçã no primeiro ramo) (Constantin et al., 2007).

De forma semelhante, experimentos conduzidos na cultura da uva demonstraram que o surgimento de sintomas visuais de intoxicação das plantas foi imediato e proporcional às subdoses aplicadas simulando deriva do 2,4-D quando as plantas encontravam-se na fase de emissão de cachos e florescimento. Neste caso, a produtividade da cultura foi afetada por todas as doses aplicadas neste estágio de crescimento. No entanto, mesmo com as injúrias severas registradas na dose mais alta, as plantas afetadas se recuperaram após duas podas para as condições de manejo regionais (duas safras por ano). No segundo experimento, foram aplicadas subdoses equivalentes a derivas de 1,0 e 2,0% em três estádios do ciclo de desenvolvimento. A aplicação de doses equivalentes a ≤2,0% de deriva simulada a partir do estágio de “meia-baga” não causou repercussões negativas em termos de injúrias visuais e produtividade (Oliveira Jr. et al., 2007). Concluiu-se,

portanto, que a susceptibilidade das culturas à deriva do 2,4-D pode variar bastante com a espécie e, principalmente, com o estágio de desenvolvimento das mesmas.

Uma outra preocupação inerente ao uso de pesticidas são os resíduos. Embora nenhum herbicida permaneça indefinidamente no ambiente, em alguns casos eles podem apresentar persistência por um período de tempo suficiente para limitar ou injuriar o desenvolvimento de espécies cultivadas em rotação, o que é conhecido como *carryover*. Uma análise mais detalhada sobre o fenômeno de *carryover* é feita no Capítulo 11, que discute a dinâmica de herbicidas no solo. Além disto, eventualmente resíduos dos herbicidas podem persistir em partes das plantas utilizadas para a alimentação humana ou animal, tornando-as impróprias para consumo.

Utilização incorreta ou mal planejada pode inviabilizar o desenvolvimento adequado da cultura, quer pela ineficiência de controle de plantas daninhas ou por injúrias causadas à cultura pelos próprios herbicidas.

Uma preocupação recente a respeito do uso de herbicidas está ligada à possibilidade de seleção de biótipos de plantas daninhas resistentes. No Brasil, existem vários relatos de resistência a herbicidas em várias espécies de plantas daninhas, os quais são discutidos em detalhes no capítulo 8 dedicado a este assunto.

Por último, o grau de eficiência dos herbicidas pode sofrer interferência de fatores externos de difícil controle, tais como a época de aplicação, clima, solo e densidade de infestação.

5. Aspectos a Serem Considerados na Escolha do Tratamento a Ser Utilizado

Por tratamento entende-se a combinação de um determinado herbicida, aplicado na dose e época recomendada. Para minimizar a possibilidade de erros, inicialmente é imprescindível conhecer qual ou quais são as espécies de infestantes predominantes na área em que deverá ser feito o controle químico, bem como qual é o estágio de desenvolvimento predominante das espécies. Muitas vezes a simples presença de uma única espécie modifica o enfoque a ser dado em termos de escolha de produto, época de aplicação ou dose a ser utilizada. Plantas perenes, por exemplo, normalmente requerem para seu manejo uma integração de métodos de controle, associados à aplicação de herbicidas sistêmicos em época adequada. De forma análoga, espécies anuais que possuem diversos fluxos de germinação podem requerer a utilização de um herbicida cuja atividade residual seja suficiente para garantir à cultura um desenvolvimento inicial livre da interferência imposta pelas plantas daninhas.

Para herbicidas aplicados ao solo, também é de grande importância o conhecimento de suas características químicas e físicas, especialmente pH, textura e teor de carbono orgânico, uma vez que estas propriedades

podem influenciar a escolha da dose a ser utilizada. Além destes dois pontos básicos, os seguintes itens devem ser considerados na escolha do tratamento a ser utilizado, entre outros:

- Registro do herbicida para uso na cultura;
- Eficiência sobre a infestação predominante na área;
- Estádio de desenvolvimento das plantas daninhas;
- Estimar qual o período de controle que se necessita;
- Custo por unidade de área;
- Disponibilidade para aquisição no mercado local;
- Menor toxicidade para o homem e ambiente;
- Efeito residual para culturas em rotação;
- Menor potencial de contaminação ambiental (deriva, lixiviação, *runoff*);
- Adequação do equipamento disponível para aplicação;
- Maior flexibilidade quanto à época de aplicação;
- Adequação ao sistema de plantio adotado na propriedade (direto/convencional);
- Potencial de seleção de biótipos de plantas daninhas resistentes aos herbicidas.

Por fim, é importante que, após a utilização de um determinado tratamento herbicida, sejam feitas observações no sentido de avaliar se a eficiência do tratamento utilizado foi satisfatória para as espécies de interesse, procurando identificar possíveis razões pelas quais eventuais falhas de controle foram observadas. O acompanhamento dos resultados proporciona ao usuário não só familiarizar-se com o modo de uso do produto, mas também um controle mais detalhado sobre a lucratividade de sua exploração agrícola.

6. Nomenclatura dos Herbicidas

Todo herbicida é nomeado pelo menos de três formas diferentes. Uma vez que são substâncias sintetizadas em laboratório, cada ingrediente ativo tem um nome químico para descrever sua estrutura química. Cada herbicida também possui um nome comum, ou nome do ingrediente ativo. Este é convencionalmente o nome pelo qual os herbicidas são conhecidos internacionalmente e pelo qual são tratados na literatura técnica e científica. Em função do *marketing* das empresas fabricantes ou formuladoras, cada herbicida tem um nome de fantasia ou nome comercial, que serve para identificar produto com fabricante e também para diferenciá-lo de outros

herbicidas com mesmo princípio ativo. Portanto, um mesmo ingrediente ativo pode ser comercializado sob diferentes nomes comerciais, dependendo do fabricante e da formulação (Tabela 4). As referências mais utilizadas na classificação de herbicidas são organizadas de acordo com o nome comum dos compostos (Rodrigues & Almeida, 2005; Senseman, 2007). No decorrer deste texto, o nome comum dos herbicidas é preferencialmente utilizado, exceto quando explicitado.

Tabela 4. Exemplos de nomenclaturas de um herbicida.

Nome químico	Nome comum	Nomes comerciais
Ácido 2-[4,5-dihidro-4-metil-4-(1-metiletil)-5-oxo-1H-imidazol-2-il]-5-etil-3-piridinecarboxílico	imazethapyr	Dinamaz, Imazetapir Plus Nortox, Imazetapir Prentiss, Pistol, Pivot, Zethapyr, Vezir,
N-(3,4-diclofenil)propanamida	propanil	Clean-Rice, Grassaid, Herbipropanil, Pilon, Propanil Agripec, Propanil Fersol, Propanil Milenia, Stam 480 (entre outros)
6-cloro- <i>N,N'</i> -dietil-1,3,5-triazina-2,4-diamina	simazine	Herbazin, Simanex
2,6-dinitro- <i>N,N'</i> -dipropil-4-(trifluorometil)benzoamina	trifluralin	Herbiflan, Premerlin 600, Trifluralina Atanor, Trifluralina Nortox Gold (entre outros)

7. Formas de Classificação de Herbicidas

Existem diversas formas de classificar os herbicidas, embora nenhuma delas seja totalmente completa ou definitiva. A maioria das classificações aborda apenas certos aspectos relacionados ao comportamento dos produtos ou às suas características.

O maior problema no desenvolvimento de um sistema de classificação adequado é a grande diversidade de modos de ação e de composição química dos herbicidas. Para se entender o controle químico, é fundamental familiarizar-se com certos termos usados na Ciência das Plantas Daninhas, muitos dos quais são utilizados nos sistemas de classificação dos herbicidas.

As principais classificações envolvem os aspectos apresentados a seguir.

7.1 Classificação quanto à seletividade

O conhecimento a respeito da seletividade de um herbicida é um pré-requisito básico para seu uso ou recomendação, uma vez que indica o espectro de plantas que são eventualmente controladas ou quais são menos sensíveis ao herbicida.

- **Herbicidas seletivos:** matam ou restringem severamente o crescimento de plantas daninhas numa cultura, sem prejudicar as espécies de interesse além de um nível aceitável de recuperação. Embora no caso dos herbicidas o conceito de seletividade esteja intrinsecamente ligado à cultura (por exemplo, imazaquin é seletivo para soja = imazaquin não afeta soja), é relativamente comum o emprego deste termo para referir-se às plantas daninhas. Neste caso, usando o exemplo anterior e considerando que o imazaquin controla basicamente espécies de folhas largas, pode-se dizer que o imazaquin controla seletivamente folhas largas, isto é, não apresenta controle de monocotiledôneas. Em alguns casos, este tipo de herbicida é chamado de “latifolicida”, ao passo que aqueles que controlam seletivamente apenas gramíneas são chamados de “graminícidias”. Bentazon, acifluorfen e lactofen são outros exemplos de herbicidas tipicamente latifolicidas. Trifluralin, clethodim e fluazifop constituem outros exemplos de graminícidias. Cada um deles pode apresentar seletividade para uma ou mais culturas independente do seu espectro de controle.
- **Herbicidas não seletivos:** são aqueles de amplo espectro de ação, capazes de matar ou injuriar severamente a maior parte das plantas, quando aplicados nas doses recomendadas. Glyphosate, paraquat, diquat e amônio-glufosinato constituem exemplos de herbicidas não seletivos. O primeiro é registrado para dessecação de manejo das plantas daninhas em áreas de semeadura direta, enquanto que os demais são mais utilizados para dessecação pré-colheita. Nenhum herbicida pertence rigidamente a nenhum dos grupos, uma vez que a seletividade é função da interação entre diferentes fatores. Com a introdução de cultivares geneticamente modificadas com resistência a herbicidas, a classificação de herbicidas como o glyphosate passou a ser questionável, uma vez que ele passou a ser utilizado também de forma seletiva em algumas culturas. No entanto, o conceito original permanece correto, uma vez que este herbicida não é seletivo para todas as cultivares daquela espécie.

7.2 Classificação quanto à translocação

- **Herbicidas com ação de contato:** Não se translocam ou se translocam de forma muito limitada. Só causam danos nas partes que entram em contato direto com os tecidos das plantas, necessitando,

portanto, de uma boa cobertura por ocasião da aplicação. O efeito normalmente é rápido e agudo, podendo se manifestar em questão de horas. Alguns herbicidas cuja ação sobre as plantas é caracteristicamente de contato são bentazon, lactofen e paraquat.

- **Herbicidas com ação sistêmica:** Normalmente são caracterizados pelo efeito mais demorado, crônico. A translocação pode ocorrer pelo xilema, pelo floema, ou através de ambos, dependendo do herbicida e da época de aplicação. Em aplicações na parte aérea, as condições de clima e de umidade do solo são fatores importantes que interferem no resultado final observado. Para que se manifeste o efeito desejado sobre as plantas daninhas, estes herbicidas dependem de franca atividade metabólica das plantas. Produtos de absorção lenta também podem sofrer influência de chuvas logo após a aplicação. Herbicidas como fluazifop, fenoxaprop, sethoxydim e clethodim são considerados de absorção rápida, não necessitando período maior do que uma hora sem chuva após a aplicação. Por outro lado, herbicidas como o glyphosate e o 2,4-D amina necessitam de um período mínimo sem chuvas após a aplicação de 4 horas para que não haja prejuízo no resultado de controle.

7.3 Classificação quanto à época de aplicação

Praticamente todos os herbicidas devem ser aplicados em um momento em particular para que o controle e a seletividade sejam maximizados. Portanto, saber quando aplicá-los para obter o efeito desejado é essencial para o uso adequado e racional do controle químico. A classificação quanto à época de aplicação reflete a eficiência de absorção por diferentes estruturas das plantas. Aqueles aplicados ao solo são normalmente absorvidos pelas raízes ou por estruturas subterrâneas antes, durante ou imediatamente após a emergência. Já aqueles aplicados à parte aérea das plantas são preferencialmente absorvidos pelas folhas. Uma vez que alguns herbicidas podem ser aplicados com sucesso em diferentes épocas, este sistema, como os anteriores, embora seja de grande importância prática, não é conclusivo também.

De modo geral, as seguintes definições de épocas de aplicação são utilizadas:

- **Pré-plantio e incorporado (PPI):** Refere-se aos produtos que são aplicados ao solo e que posteriormente precisam de incorporação mecânica ou por meio de irrigação. Herbicidas que precisam ser aplicados desta forma normalmente apresentam uma ou mais das seguintes características:
 - Mecanismo de ação que requer contato entre o herbicida e plântulas antes ou durante a emergência;

- Baixa solubilidade em água;
- Fotodegradação;
- Volatilidade (alta pressão de vapor).

O trifluralin é considerado um herbicida de baixa solubilidade ($0,3 \text{ mg L}^{-1}$) e de alta volatilidade (pressão de vapor = $1,1 \times 10^{-4} \text{ mm Hg}$). A alta pressão de vapor faz com que a perda de produto por volatilização seja acentuada quando o produto permanece na superfície do solo. Este fato, aliado à baixa solubilidade e às perdas por fotodegradação, fazem com que o produto normalmente necessite de incorporação ao solo. Novas formulações de trifluralin têm sido desenvolvidas para evitar a obrigatoriedade de incorporação, mas mesmo para estas formulações, uma incorporação leve resulta no aumento da eficácia. Já o EPTC, tendo maior solubilidade (370 mg L^{-1}), pode ser incorporado também por meio de uma irrigação logo após a aplicação. Ambos herbicidas, embora de grupos químicos diferentes, atuam sobre o mesmo processo metabólico (a divisão celular), o que faz com que ambos sejam efetivos apenas quando em contato com os tecidos em fase de divisão celular. Formulações de herbicidas que requerem incorporação ao solo encontram-se em desuso, tanto pela maior exigência de trabalho para sua utilização quanto pelo fato de que tais formulações são incompatíveis com o sistema de plantio direto.

- **Pré-emergência (PRÉ):** A aplicação é feita após a semeadura ou plantio, mas antes da emergência da cultura e das plantas daninhas. Em alguns casos, como na cultura do algodão, pode haver aplicações de herbicidas em pré-emergência das plantas daninhas, mas após a emergência da cultura. Neste caso, as aplicações são dirigidas às entrelinhas da cultura, depois que esta atingiu certa altura. Tendo em vista que as plantas daninhas ainda não emergiram, tal aplicação é considerada como sendo em pré-emergência. Nas aplicações em PRÉ, a eficácia dos herbicidas depende muito da disponibilidade de água no solo, uma vez que estes produtos atuam sobre processos como a germinação de sementes ou o crescimento radicular. Imazaquin, alachlor e diuron constituem exemplos típicos de herbicidas utilizados em PRÉ.
- **Pós-emergência (PÓS):** Nas aplicações em pós-emergência, as plantas daninhas encontram-se emergidas, mas a cultura nem sempre. Um exemplo típico de aplicação em PÓS sem a presença da cultura é a aplicação realizada para a dessecação antes do plantio direto de culturas. Na maioria dos casos de aplicações em PÓS, no entanto, tanto plantas daninhas quanto culturas encontram-se emergidas. Neste caso, o herbicida deve ser absorvido em maior parte

pela via foliar, além de requerer da cultura tolerância à exposição direta ao produto.

A idade das plantas daninhas quando da aplicação em PÓS é muito importante para a eficiência deste tipo de aplicação. As aplicações normalmente são feitas em fases precoces do desenvolvimento das invasoras. Embora variável entre plantas, este estágio geralmente compreende a fase até 3-4 folhas para as dicotiledôneas e antes ou até o início do perfilhamento para gramíneas. Às vezes são ainda utilizados os termos PÓS inicial e PÓS precoce para se referir a aplicações realizadas em estádios ainda mais precoces de desenvolvimento das plantas daninhas. Aplicações em PÓS tardia (plantas adultas) muitas vezes são necessárias, como, por exemplo, na dessecação de lavouras antes da colheita ou na operação de manejo das plantas daninhas em áreas de semeadura direta. Em função do estágio de desenvolvimento avançado das plantas, doses mais elevadas ou produtos sistêmicos são usados nestas situações. Exemplos de herbicidas cuja aplicação é feita caracteristicamente em pós-emergência são sethoxydim, glyphosate, bentazon, lactofen e ioxynil.

7.4 Classificação quanto à estrutura química

A maior limitação deste sistema de classificação está no fato de que diferentes herbicidas pertencentes a uma mesma família de compostos podem atuar de maneira distinta no controle das plantas daninhas. Os sistemas de classificação baseados apenas na estrutura química são, portanto, insuficientes para o propósito de esclarecer a atividade dos herbicidas sobre as plantas. No entanto, associada à classificação concernente aos mecanismos de ação dos herbicidas, torna-se de grande utilidade. Os principais grupos químicos são abordados no capítulo referente aos mecanismos de ação de herbicidas.

7.5 Classificação quanto ao mecanismo de ação

O agrupamento de herbicidas segundo a forma de atuação nas plantas é uma das mais utilizadas e, uma vez que aborda um enfoque fisiológico da atuação dos herbicidas, pode englobar diferentes famílias de compostos químicos sob um mesmo mecanismo de ação.

Conhecer o mecanismo de ação requer um intrincado estudo que envolve aspectos relacionados à química, bioquímica e fisiologia vegetal. Embora o conhecimento a respeito do mecanismo de ação de um herbicida não implique diretamente em um melhor nível de controle de plantas daninhas, ele provê uma ferramenta fundamental no entendimento dos mecanismos de seletividade, do comportamento dos herbicidas nas plantas e no ambiente e do efeito de fatores ambientais na eficiência destes produtos a campo. Os

principais mecanismos de ação dos herbicidas são descritos em detalhes no capítulo 7.

7.6 Outras classificações

Algumas classificações envolvem aspectos específicos e não foram incluídas no âmbito da discussão deste texto. Os herbicidas podem ser classificados, por exemplo, quanto ao tipo de formulação, volatilidade, persistência, potencial de lixiviação, toxicidade, classe toxicológica, solubilidade e polaridade ou forma de dissociação. Alguns destes itens são discutidos no capítulo que discute o comportamento de herbicidas no solo.

Há, ainda, outras formas de classificação que, no entanto, não são aceitas universalmente. Uma classificação baseada na forma com que os herbicidas são usados (aquáticos, de contato, translocáveis pelas folhas e aplicados ao solo) foi adotada por Radosevich et al. (1997). Os herbicidas utilizados no controle de plantas daninhas aquáticas são, normalmente, classificados à parte, em função da especificidade de uso. Alguns dos herbicidas usados para este fim são também utilizados em áreas agrícolas, como o 2,4-D. No entanto, outros produtos como o glyphosate possuem formulações especiais para esta finalidade. Outros, ainda, são especificamente utilizados nestas áreas, como o fluridone.

Referências

- Bucha, H.C. & Todd, C.W., 3(p-chlorophenyl)-1,1-dimethylurea – a new herbicide. *Science*, 114:403–494, 1954.
- Constantin, J.; Oliveira Jr., R.S.; Brandão Filho, J.U.T.; Callegari, O.; Pagliari, P.H. & Arantes, J.G.Z., Efeito de sub-doses de 2,4-D na produtividade de fumo e susceptibilidade da cultura em função de seu estágio de desenvolvimento. *Engenharia Agrícola*, 27:30–34, 2007.
- Fagliari, J.R.; Oliveira Jr., R.S. & Constantin, J., Impact of sub-lethal doses of 2,4-D, simulating drift, on tomato yield. *J Environ Sci Health B*, 40:201–206, 2005.
- Hammer, C.L. & Tukey, H.B., The herbicidal action of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and 2,4,5-trichlorophenoxyacetic acid on bindweed. *Science*, 100:154–155, 1944.
- Marth, P.C. & Mitchell, J.W., 2,4-dichlorophenoxyacetic acid as a differential herbicide. *Bot Gaz*, 106:224–232, 1944.
- Oliveira Jr., R.S.; Constantin, J.; Brandão Filho, J.U.T.; Callegari, O.; Pagliari, P.H.; Cavaliere, S.D.; Framesqui, V.P.; Carreira, S.A.M. & Roso, A.C., Efeito de sub-doses de 2,4-D na produtividade de uva Itália e susceptibilidade da cultura em função de seu estágio de desenvolvimento. *Engenharia Agrícola*, 27:35–40, 2007.

- Oliveira Jr., R.S.; Pires, N.M.; Fornarolli, D.A.; Chehata, A.N. & Andrade, O., Comportamento do glyphosate isolado ou formulado com diuron ou simazine no controle de plantas daninhas em citros na época seca e chuvosa para as condições do noroeste do paraná. In: *Resumos do Congresso Brasileiro de Herbicidas e Plantas Daninhas*. Florianópolis, SC: SBCPD, 1995. p. 377-378.
- Pokorny, R., Some chlorophenoxyacetic acids. *J Amer Chem Soc*, 63:176, 1941.
- Radosevich, S.; Holt, C. & Ghera, C., *Weed Ecology: Implications for Weed Management*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1997. 589 p.
- Rodrigues, B.N. & Almeida, F.S., *Guia de Herbicidas*. 5a edição. Londrina, PR: Edição dos autores, 2005. 592 p.
- Senseman, S.A., *Herbicide Handbook*. 9a edição. Champaign, EUA: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.
- Zimdhal, R.L., *Fundamentals of Weed Science*. 6a edição. San Diego, EUA: Academic Press, 1993. 450 p.

Mecanismos de Ação de Herbicidas

Rubem Silvério de Oliveira Jr.

1. Introdução

Para identificar herbicidas é útil agrupá-los de acordo com seu mecanismo de atuação nas plantas e sua estrutura química básica. De forma geral, herbicidas que pertencem ao mesmo grupo químico apresentam sintomas similares nas plantas susceptíveis, embora existam exceções à regra (Zimdhal, 1993). Também pode haver forte similaridade nos sintomas mostrados pelas plantas entre herbicidas de famílias químicas diferentes, mas que apresentam o mesmo mecanismo de ação.

O primeiro ponto importante que deve ser esclarecido é a diferença entre **mecanismo** de ação e **modo** de ação. Considera-se que o mecanismo de ação diz respeito ao primeiro ponto do metabolismo das plantas onde o herbicida atua. Neste caso, o mecanismo de ação é normalmente o primeiro de uma série de eventos metabólicos que resultam na expressão final do herbicida sobre a planta. O conjunto destes eventos metabólicos, incluindo os sintomas visíveis da ação do herbicida sobre a planta, denomina-se modo de ação.

A classificação dos herbicidas com base em seu mecanismo de ação tem sofrido mudanças ao longo do tempo, tanto em função da descoberta de novos herbicidas quanto pela elucidação dos sítios de atuação nas plantas. A classificação internacionalmente aceita atualmente é aquela proposta pelo *Herbicide Resistance Action Committee* (HRAC). Nela, os herbicidas são classificados por ordem alfabética de acordo com seus sítios de atuação e classes químicas (Tabela 1). No caso de diferentes grupos químicos compartilharem um mesmo mecanismo de ação, apenas uma letra é utilizada. No caso dos inibidores da fotossíntese, as subclasses C1, C2 e C3 indicam diferentes formas de ligação à proteína D1. O sintoma de *bleaching* (branqueamento) também pode ser causado de diferentes formas. Por consequência, os subgrupos F1, F2 e F3 foram criados. Herbicidas com sítios de ação desconhecidos são classificados como “desconhecidos” e agrupados no grupo “Z” até que seja possível classificá-los adequadamente. Para evitar confusões com “I” e “O”, as categorias “J” e “Q” foram omitidas. Novos herbicidas serão classificados nos respectivos grupos ou em novos grupos

(R, S, T...). O sistema de classificação da *Weed Science Society of America* (WSSA) (numérico) também é listado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de herbicidas segundo o mecanismo de ação.

HRAC	Sítio de atuação	Grupo químico	WSSA
A	Inibição da acetil CoA carboxilase (ACCase)	Ariloxifenoxipropionatos (FOPs)	1
		Ciclohexanodionas (DIMs)	1
		Fenilpirazolinás (DENs)	1
B	Inibição da acetolactato sintase (ALS) (ou acetohidróxidoácido sintase AHAS)	Sulfoniluréias	2
		Imidazolinonas	2
		Triazolopirimidinas	2
		Pirimidinil(tio)benzoatos	2
		Sulfonilaminocarbonil-triazolinonas	2
C1	Inibição da fotossíntese no fotossistema II	Triazinas	5
		Triazinonas	5
		Triazolinonas	5
		Uracilas	5
		Piridazinonas	5
		Fenil-carbamatos	5
C2	Inibição da fotossíntese no fotossistema II	Uréias	7
		Amidas	7
C3	Inibição da fotossíntese no fotossistema II	Nitrilas	6
		Benzotiadiazinonas	6
		Fenil-piridazinas	6
D	Inibição da fotossíntese no fotossistema I	Bipiridíliuns	22
E	Inibição da protoporfirinogênio oxidase (PPO)	Difeniléteres	14
		Fenilpirazoles	14
		N-fenilftalimidas	14
		Tiadiazoles	14
		Oxadiazoles	14
		Triazolinonas	14
		Oxazolidinedionas	14
		Pirimidindionas	14
		Outros	14

Continuação da Tabela 1

HRAC	Sítio de atuação	Grupo químico	WSSA
F1	Inibição da biossíntese de carotenóides na fitoenol desidrogenase (PDS)	Piridazinonas	12
		Piridinecarboxamidas	12
		Outros	12
F2	Inibição da biossíntese de carotenóides na 4-hidroxifenil-piruvato-dioxigenase (4-HPPD)	Tricetonas	27
		Isoxazoles	27
		Pirazoles	27
		Outros	27
F3	Inibição da biossíntese de carotenóides (alvo desconhecido)	Triazoles	11
		Isoxazolidinonas	13
		Difeniléteres	11
G	Inibição da EPSP sintase	Glicinas	9
H	Inibição da glutamina sintetase	Ácido fosfínico	10
I	Inibição da DHP (dihidropteroato sintase)	Carbamatos	18
		Dinitroanilinas	3
K1	Inibição da formação de microtúbulos	Fosforoamidatos	53
		Piridinas	3
		Benzamidas	3
		Ácido benzóico	3
		Outros	3
K2	Inibição da mitose	Carbamatos	23
		Cloroacetamidas	15
K3	Inibição da divisão celular (ou Inibição de VLCFA (veja texto))	Acetamidas	15
		Oxiacetamidas	15
		Tetrazolinonas	15
		Outros	15
		Outros	15
L	Inibição da síntese de (celulose) parede celular	Nitrilas	20
		Benzamidas	21
		Triazolocarboxamidas	27
		Ácido quinolinocarboxílico	26/27
M	Desacopladores (Disruptores de membrana)	Dinitrofenóis	24
N	Inibição da síntese de lipídeos - diferentes de inibidores da ACCase	Tiocarbamatos	8
		Fosforoditioatos	8
		Benzofuranas	16
		Ácido clorocarbônico	26

Continuação da Tabela 1

HRAC	Sítio de atuação	Grupo químico	WSSA
O	Mimetizadores da auxina	Ácido fenóxicarboxílico	4
		Ácido benzóico	4
		Ácido piridincarboxílico	4
		Ácido quinolinocarboxílico	4
		Outros	4
P	Inibidores do transporte de auxinas	Ftalamatos	19
		Semicarbazonas	19
R	
S	
.	
Z	Desconhecidos	Ácido arilaminopropiônico	25
		Pirazólíums	26
		Organoarsenicais	17
		Outros	

A seguir, os principais mecanismos de ação são detalhados em relação a suas características gerais, ao modo de ação e à seletividade. Também são mencionados os principais grupos químicos, os princípios ativos e as marcas de herbicidas comerciais registrados para uso no Brasil.

2. Mimetizadores da Auxina – Grupo O⁽⁴⁾

Grupo de herbicidas também conhecido por reguladores de crescimento, auxinas sintéticas ou herbicidas hormonais, em função da similaridade estrutural com a auxina natural das plantas. Este grupo tem grande importância histórica, uma vez que o 2,4-D foi o primeiro composto orgânico sintetizado pela indústria utilizado como herbicida seletivo. Além disto, foi o primeiro herbicida a ser usado em doses baixas ($\leq 1 \text{ kg ha}^{-1}$). Historicamente, o 2,4-D e o MCPA são importantes porque ajudaram a dar o estímulo ao desenvolvimento inicial da indústria química na agricultura.

A mistura de 2,4,5-T com o 2,4-D também foi utilizada durante a guerra do Vietnã como o “agente laranja”. O agente laranja era utilizado para desfolhar partes da selva entre o Vietnã, o Laos e o Camboja. Durante a fase americana deste longo conflito, soldados norte-vietnamitas e outros que supriam os vietcongs (os guerrilheiros sul-vietnamitas), viajavam do Vietnã do Norte para o Vietnã do Sul pela região da fronteira. Esta região ficou conhecida como a *trilha de Ho Chi Minh*, e era considerada como uma grande rota de suprimento para os guerrilheiros do sul. O exército norte-americano precisava cortar esta rota de suprimentos, de modo

que foi decidido desfolhar a selva e expor esta artéria de suprimento. No final, esta idéia não funcionou militarmente. Era muito difícil desfolhar áreas tão grandes, especialmente quando os viajantes podiam facilmente mudar de rota em resposta ao agente laranja.

Quando esta idéia foi concebida, os americanos precisaram de uma quantidade muito grande destes herbicidas muito rapidamente. A ganância por grandes vendas induziu muitas companhias químicas a produzir rapidamente estes pesticidas para o exército. Como consequência, muitas partidas feitas inicialmente continham níveis inaceitáveis de um subproduto da síntese do 2,4,5-T: a tetraclorodibenzo-dioxina (TCDD). Os efeitos cancerígenos deste contaminante, principalmente aqueles de longo prazo, permanecem ainda envoltos em certo mistério e confusão, dando origem a muita controvérsia.

2.1 Características gerais

1. Afetam o crescimento das plantas de maneira similar à auxina natural das plantas (AIA). No entanto, são mais persistentes e mais ativos que o AIA;
2. Todos são translocados tanto via floema quanto pelo xilema e, portanto, podem controlar diversas plantas perenes. Existe, entretanto, grande diferença de translocação entre produtos e, para um mesmo produto, diferenças entre espécies de plantas;
3. Efeitos no crescimento das plantas podem ser notados em doses muito baixas. Pulverizadores reutilizados sem lavagem ou limpos de forma não adequada ou pequenas quantidades destes produtos carregados por deriva podem causar sérios prejuízos em culturas sensíveis;
4. Com exceção do picloram, não persistem no solo por mais do que uma safra;
5. Todos apresentam baixa toxicidade para mamíferos;
6. Controlam basicamente plantas daninhas dicotiledôneas, anuais ou perenes. Seletivos para gramíneas em geral;
7. Em misturas com outros produtos, são utilizados como dessecantes e no controle de arbustos também; isolados ou em misturas, constituem os principais herbicidas utilizados em pastagens;
8. Para evitar problemas de deriva, deve-se evitar aplicações de baixo volume e alta pressão, evitando-se também horários de vento. Para o 2,4-D, formulações éster são mais voláteis do que formulações amina, devendo ser evitadas;
9. Algumas culturas extremamente sensíveis a concentrações muito baixas destes herbicidas incluem tomate, uva, algodão, cucurbitáceas e soja.

2.2 Modo de ação

A ação inicial (mecanismo de ação) destes compostos envolve o metabolismo de ácidos nucleicos e a plasticidade da parede celular. Pensa-se que estes herbicidas possam causar a acidificação da parede celular através do estímulo da atividade da bomba de prótons da ATPase, ligada à membrana celular. A redução no pH apoplástico induz à alongação celular pelo aumento da atividade de certas enzimas responsáveis pelo afrouxamento celular. Baixas concentrações destes herbicidas também estimulam a RNA polimerase, resultando em aumentos subsequentes de RNA, DNA e biossíntese de proteínas. Aumentos anormais nestes processos levam à síntese de auxinas e giberilinas, as quais promoverão divisão e alongamento celular acelerado e desordenado nas partes novas da planta, ativando seu metabolismo e levando ao seu esgotamento. Por outro lado, em concentrações mais altas, estes herbicidas inibem a divisão celular e o crescimento, geralmente nas regiões meristemáticas, as quais acumulam tanto assimilados provenientes da fotossíntese quanto o herbicida transportado pelo floema. Estes herbicidas estimulam a liberação de etileno que, em alguns casos, pode produzir sintomas característicos de epinastia associados à exposição a estes herbicidas (Senseman, 2007).

O primeiro sintoma evidente de injúrias de herbicidas hormonais em plantas de folhas largas é a epinastia das folhas e pecíolos. À medida que outras funções metabólicas são afetadas, o metabolismo geral e as funções celulares normais são interrompidas, causando o aparecimento dos seguintes sintomas:

- Deformações nas nervações e no limbo foliar;
- Paralisação do crescimento e engrossamento de raízes, principalmente na região das gemas, podendo também induzir ao aparecimento de raízes adventícias;
- Tumores ao longo do caule da planta (principalmente nos nós), os quais estão ligados à obstrução do fluxo do floema;
- A morte de plantas susceptíveis ocorre de forma lenta, geralmente entre 3 e 5 semanas após a aplicação.

2.3 Seletividade

No caso dos herbicidas mimetizadores da auxina, as gramíneas são, em grande parte, tolerantes a herbicidas deste grupo. As gramíneas que eventualmente são afetadas desenvolvem enrolamento de folhas e formação anormal de estruturas vegetativas reprodutivas.

De modo geral, a tolerância das gramíneas é determinada por um somatório de fatores: a penetração nestas plantas é muito baixa e a sua translocação pelo floema é limitada, por causa de estruturas anatômicas como nós e meristema intercalar, os quais favorecem reações de conjugação.

2.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Ác. benzóico	Dicamba	Banvel
	Aminopyralid	-
	Clopyralid	-
Ác. piridinecarboxílicos	Fluroxypir	Starane Browser, Crater, Leopard, Navigator, Padron, Pique,
	Picloram	Runner, Texas, Toco, Tropero
	Triclopyr	Crescendo, Garlon, Triclon, Triclopyr Volagro
Ác. fenoxicarboxílicos	2,4-D	Aminamar, Aminol, Bratt, Brion, Campeon, Capri, Deferon, Dez, DMA-806, Grant, Herbi-D, Navajo, Pren-D 806, Tonto 867, U 46 BR, Weedar, 2,4-D Agritec, 2,4-D Amina 72, 2,4-D Fersol
	MCPA	Weedone
Ác. quinolinocarboxílico	Quinclorac	Facet

Principais misturas:

- Aminopyralid+2,4-D: Jaguar
- Ametryn+diuron+MCPA: Agritrin
- Aminopyralid+fluroxypyr: Dominum
- Fluroxypir+picloram: Plenum
- Fluroxypir+triclopyr: Truper
- Picloram+2,4-D: Arena, Artys, Disparo, Dontor, Jacaré, Mannejo, Navigator-D, Norton, Tordon, Tractor, Tucson, Turuna, Viktor, 2,4-D+Picloram Nortox
- Picloram+triclopyr: Togar
- Propanil+triclopyr: Stampir

O mecanismo de ação do quinclorac nas plantas não é completamente conhecido. Nas espécies de folhas largas susceptíveis, a ação dele parece similar às auxinas naturais (AIA). Em gramíneas susceptíveis, no entanto, o quinclorac pode inibir uma enzima associada com a biossíntese de celulose (parede celular). Em função desta particularidade, este herbicida pode

também ser caracterizado como sendo do grupo L⁽²⁷⁾. Os efeitos nas gramíneas parecem estar ligados também a aumentos na produção de etileno e de cianeto (Grossman & Kwiatkowski, 1993).

O aminopyralid e o clopyralid são duas novas moléculas que pertencem ao grupo químico dos ácidos piridinecarboxílicos, que não apresentam produtos comerciais registrados no Brasil. No entanto, são utilizados em herbicidas compostos por misturas formuladas. Um novo grupo químico, o dos ácidos pirimidinecarboxílicos, também está sendo introduzido no mercado, tendo o aminocyclopyrachlor como a principal molécula em fase de desenvolvimento.

Há outros princípios ativos e respectivos grupos químicos que não apresentam produtos comerciais no Brasil, tais como clomeprop, dichlorprop, mecoprop, MCPB (ácido fenoxicarboxílico), chloramben, TBA (ácido benzóico) e quinmerac (ácido quinolinocarboxílico), além do benazolin-ethyl (outros).

3. Inibidores do Fotossistema II – Grupos C1⁽⁵⁾, C2⁽⁷⁾ e C3⁽⁶⁾

São também conhecidos como inibidores da síntese de Hill, por inibirem a evolução do oxigênio a partir da água na presença de cloroplastos e de um acceptor adequado de elétrons. A ação seletiva destes compostos foi descoberta na década de 50, mas tais herbicidas constituem, até hoje, um dos mais numerosos e importantes grupos de herbicidas, com ampla utilização em diversas culturas. A introdução de atrazine no início da década de 60 revolucionou a produção de milho, já que a partir de então um herbicida confiável para o controle de folhas largas nesta cultura passou a estar disponível.

Os inibidores da fotossíntese são considerados inibidores do transporte de elétrons (Balke, 1985), uma vez que resultam na remoção ou inativação de um ou mais carregadores intermediários do transporte de elétrons.

3.1 Características gerais

1. A taxa de fixação de CO₂ declina poucas horas após o tratamento em plantas susceptíveis tratadas. Em plantas tolerantes, a taxa de fixação não cai a níveis tão baixos e em poucos dias retorna ao normal; nas sensíveis a taxa declina até próximo de zero em 1 ou 2 dias e não ocorre recuperação;
2. Aparentemente todos podem ser absorvidos via radicular e a maioria através das folhas. No entanto, quando utilizados em aplicações em pós-emergência, uma cobertura completa das plantas é importante, uma vez que a translocação é limitada. Adjuvantes são normalmente adicionados para aumentar a ação foliar;
3. Todos se translocam basicamente via xilema; portanto, plantas perenes só podem ser afetadas em aplicações via solo;

4. Plantas tornam-se mais susceptíveis a aplicações em pós-emergência quando baixa intensidade de luz ocorre durante os dias que precedem a aplicação e alta intensidade de luz ocorre nos dias posteriores;
5. Em geral o movimento no solo vai de baixo a moderado, embora possa variar de acordo com o composto e o solo. A persistência é extremamente variável, podendo variar de alguns dias até mais de um ano;
6. Interação sinérgica geralmente ocorre quando aplicados ao mesmo tempo ou próximos à aplicação de inseticidas inibidores da colinesterase;
7. Controlam muitas espécies de folhas largas e algumas gramíneas.

3.2 Modo de ação

A inibição da fotossíntese acontece pela ligação dos herbicidas deste grupo ao sítio de ligação da Q_B , na proteína D1 do fotossistema II, o qual se localiza nas membranas dos tilacóides dos cloroplastos, causando, por consequência, o bloqueio do transporte de elétrons de Q_A para Q_B . Isto interrompe a fixação de CO_2 e a produção de ATP e $NADPH_2$, os quais são elementos essenciais para o crescimento das plantas. A morte das plantas, entretanto, na maioria dos casos ocorre por causa de outros processos.

Os primeiros trabalhos sugeriam que as plantas morriam por “inanição”, como resultado da inibição da reação luminosa da fotossíntese. No entanto, as plantas tratadas com inibidores da fotossíntese morrem mais rápido quando colocadas à luz do que quando são colocadas no escuro. Isto prova que algo além da inibição da fotossíntese é responsável pelo efeito herbicida observado. Pensa-se que a clorose foliar que se desenvolve após o tratamento seja causada pela peroxidação de lipídeos.

Lipídeos e proteínas são oxidados, resultando em rompimento de membranas, o que faz com que células e organelas desidratem e desintegrem-se rapidamente.

A peroxidação dos lipídeos é autocatalítica e se espalha para outros lipídeos constituintes de membranas, como as do cloroplasto e de outras estruturas celulares. Estas reações acabam por promover a destruição das membranas e a perda de clorofila, resultando no aumento de tamanho e da desorganização dos tilacóides e de outras membranas celulares (Bartels, 1985a). O processo de peroxidação acontece basicamente pela interrupção do fluxo de elétrons no fotossistema II, o que gera um estado energético tão elevado da clorofila (estado triplet), que sobrecarrega o efeito de atenuação de energia promovido pelos pigmentos carotenóides. O excesso de clorofila triplet pode iniciar o processo de peroxidação de lipídeos por meio de dois mecanismos (Dan Hess, 1994b): o primeiro é a formação direta de radicais lipídicos nos ácidos graxos insaturados constituintes das membranas. O segundo é que a clorofila triplet pode reagir com o oxigênio para produzir

oxigênio singlet. O oxigênio pode então reagir com estes radicais para iniciar o processo de peroxidação que resulta no dano às membranas.

3.3 Locais de atuação nas plantas

Considera-se que existam três formas de ligação dos herbicidas à proteína D1, as quais formam subgrupos dentro deste mecanismo de ação. O primeiro subgrupo é composto por herbicidas dos grupos químicos fenilcarbamatos, piridazinonas, triazinas, triazinonas, triazolinonas e uracilas - C1⁽⁵⁾; o segundo, pelos herbicidas dos grupos amidas e uréias - C2⁽⁷⁾; e o terceiro pelos herbicidas dos grupos benzotriazinonas, nitrilas e fenilpiridazinonas - C3⁽⁶⁾. Independente do sítio específico de ligação, estes herbicidas apresentam sintomas semelhantes de progressão de injúrias nas plantas susceptíveis.

O diuron e outros derivados da uréia ligam-se a proteínas de peso molecular definido no “sítio da uréia”, enquanto outros herbicidas, especialmente as triazinas, ligam-se a proteínas de uma forma diferente. O sítio de ligação de ambos na cadeia de transporte de elétrons do cloroplasto é indicado na Figura 1. Um terceiro sítio, não descrito na Figura 1, é o local de atuação das benzotriazinonas, nitrilas e fenilpiridazinonas. Existe ainda uma outra família de inibidores fotossintéticos que também se liga ao grupamento QB. São os chamados inibidores “não clássicos”, constituídos pelos dinitrofenóis (Figura 1). Recentemente alguns derivados dos dinitrofenóis têm sido descritos como inibidores da fotossíntese, como por exemplo as piridazinonas (norflurazon) e quinolinas (quinclorac). No entanto, considera-se que a atuação dos fenóis sobre a fotossíntese constitua apenas um evento secundário na toxicidade destes herbicidas para as plantas.

3.4 Seletividade

As triazinas simétricas como atrazine são degradadas em muitas plantas tolerantes ao metabolismo do herbicida, especialmente pelo processo de conjugação com glutatona nas folhas, o que faz com que ele nunca chegue ao cloroplasto para causar injúrias. Espécies como milho, *Panicum miliaceum*, *Panicum dichotomiflorum*, *Digitaria spp.* e *Setaria spp.* são especialmente adaptadas a fazer este processo de destoxificação (University of Minnesota, 2009).

Além do processo de metabolismo, uma série de fatores, isolados ou em conjunto, pode ser responsável pela seleção de plantas tolerantes ou susceptíveis a herbicidas deste grupo:

- Localização no solo (seletividade de posição);
- Aplicação dirigida;
- Absorção diferencial por raízes ou folhas;
- Translocação diferencial das raízes para as folhas;

3.5 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Amidas	Propanil	Clean-Rice, Grassaid, Grassmax, Herbipropanin, Pilon, Propanil Agripec, Propanil Defesa, Propanil Fersol, Satanil, Spada, Stam
Benzotiadiazinonas	Bentazon	Banir, Basagran
Nitrilas	Ioxynil	Totril
Triazinas	Ametryne	Ametrex, Ametrina Agripec, Ametrina Atanor, Gesapax, Herbipak, Metrimex
	Atrazine	Atranex, Atrazina Atanor, Atrazina Nortox, Atrazinax, Blast, Coyote, Genius, Gesaprim, Herbitrin, Most, Posmil, Primóleo, Proof, Siptran, Siptroil, Sprint
	Prometryne	Gesagard
	Simazine	Herbazin, Simanex
Triazinonas	Hexazinone	Broker, Destaque, Druid, Hexafort, Hexanil, Hexazinona Nortox, MagnusBR, Netuno, Perform, Rambo, Style
	Metamitron	Goltix
	Metribuzin	Sencor, Soccer
Triazolinonas	Amicarbazone	Dinamic
Uréias	Diuron	Centlon, Direx, Diurex, Diuron, Diuron Fersol, Diuron Milenia, Diuron Nortox, Diuron Agritec, Diuron Volagro, Diuron Volcano, Grasp, Herburon, Karmex, Netun
	Linuron	Afalon, Linurex
	Thidiazurom	Ruget
	Tebuthiuron	Aval, Butiron, Combine, Graslan, Lava, Perflan, Spike

Principais misturas:

- Ametryne+diuron+MCPA: Agritrin
- Ametryne+diuron: Ametron, Bimetron
- Ametryne+trifloxysulfuron: Krismat
- Ametryne+simazine: Simetrex, Topeze

- Ametryne+clomazone: Sinerge
- Alachlor+atrazine: Agimix, Alaclor+Atrazina Nortox, Alazine, Boxer
- Atrazine+simazine: Atramix, Atrasimex, Bench, Extrazin, Herbi-mix, Primatop, Senior, Simtrac, Triamex
- Atrazine+glyphosate: Gillanex
- Atrazine+s-metolachlor: Primagram Gold, Primaiz, Primestra Gold
- Atrazine+nicosulfuron: Sanson AZ
- Bentazon+dicloreto de paraquat: Pramato
- Bentazon+imazamox: Amplo
- Bromacil+diuron: Krovar
- Clomazone+hexazinone: Discover, Ranger
- Diuron+dicloreto de paraquat: Gramocil
- Diuron+glyphosate: Glydur, Tropuron
- Diuron+hexazinone: Advance, Avelex, Confidence, Coronel BR, Dihex, Dizone, Help, Hexaron, Hexazinona-D Nortox, Jump, Rancho, Scopus, Soldier, Velpar Max, Velpar K, Xekil
- Diuron+hexazinone+sulfometuron: Front
- Diuron+tebutiuron: Bimate
- Diuron+thidiazuron: Dropp Ultra
- Diuron+MSMA: Fortex
- Glyphosate+simazine: Tropazin

Outros princípios ativos com o mesmo mecanismo de ação, mas que não são registrados para uso no Brasil incluem pentanochlor (amidas), bromofenoxim, bromoxynil (nitrilas), cyanazine, desmetryne, dimethametryn, prometon, propazine, simetryne, terbutometuron, terbutylazine, terbutryne, trietazine (triazinas), bromacil, lenacil, terbacil (uracilas), chloridazon (piridazinonas), desmedipham, phemedipham (fenilcarbamatos), chlorobromuron, chlorotoluron, chloroxuron, dimefuron, ethidimuron, fenuron, fluometuron, isoproturon, isouron, metobromuron, metabenzthiazuron, metoxuron, monolinuron, neburon, siduron (uréias) e pyridafol e pyridate (fenilpiridazininas).

O bentazon, muito embora esteja incluído entre os inibidores do fotossistema II, apresenta muitas características em comum com os inibidores do fotossistema I:

- É utilizado apenas em pós-emergência, devido à absorção primariamente foliar e à pequena capacidade de translocação. Os efeitos de injúria nas plantas manifestam-se próximos ou nos locais pulverizados, ou seja, é considerado um herbicida de contato;
- As plantas são mais sensíveis quando mais tecidos tenros estão presentes;
- Algumas culturas nas quais é usado podem evidenciar injúrias relativamente severas (necrose), mas recuperam-se após certo tempo, uma vez que não apresenta translocação e nem efeito residual no solo;
- A dessecação do tecido foliar e perda da capacidade fotossintética leva à paralisação do crescimento e à morte.

4. Inibidores do Fotossistema I – Grupo D⁽²²⁾

Também são conhecidos como Inibidores do fotossistema I ou formadores de radicais livres. Embora os herbicidas agrupados neste mecanismo de ação em última instância causem a inibição da fotossíntese, a forma pela qual este processo é interrompido é diferente daquela imposta pelos inibidores do fotossistema II. Este grupo atua como falso acceptor de elétrons no fotossistema I, e causa injúrias nas plantas completamente distintas daquelas causadas pelos herbicidas inibidores do fotossistema II.

4.1 Características gerais

1. Apresentam alta solubilidade em água, sendo normalmente formulados como soluções aquosas;
2. São cátions fortes. Em função desta característica, são muito fortemente sorvidos por colóides do solo, o que resulta na sua rápida inativação;
3. Por causa da rápida absorção foliar, chuvas ocorridas 30 minutos após a aplicação não interferem na eficiência destes herbicidas;
4. Os sintomas de fitointoxicação nas plantas manifestam-se rapidamente, e a morte pode ocorrer em uma a dois dias. Os sintomas aparecem tão mais rapidamente quanto maior for a intensidade luminosa após a aplicação;
5. São considerados produtos de contato. Geralmente a morte das plantas acontece tão rapidamente que a translocação é muito limitada;
6. Toxicidade para mamíferos é alta para o paraquat.
7. Usados extensivamente na operação de manejo em sistemas de semeadura direta, isolados ou em mistura com outros herbicidas, para o controle de plantas daninhas em áreas não cultivadas, renovação de pastagens e dessecação pré-colheita. Podem ainda ser aplicados em jato dirigido em milho, cana e em espécies frutíferas perenes.

4.2 Modo de ação

Os bupiridíliuns, tais como o paraquat e o diquat, com potenciais redox de -249 e -446 mV (Halliwell, 1991), são normalmente dicátions, mas têm a habilidade de, ao funcionarem como aceptores de elétrons no fotossistema I na fotossíntese, tornarem-se radicais livres (mono-cátions). O sítio no qual ambos atuam no fotossistema I é na ou muito próximo à ferredoxina, em função do potencial redox destas moléculas (Figura 2). Pensa-se que o doador imediato de elétrons para o paraquat seja um grupamento ferro-enxofre (Dan Hess, 1994a).

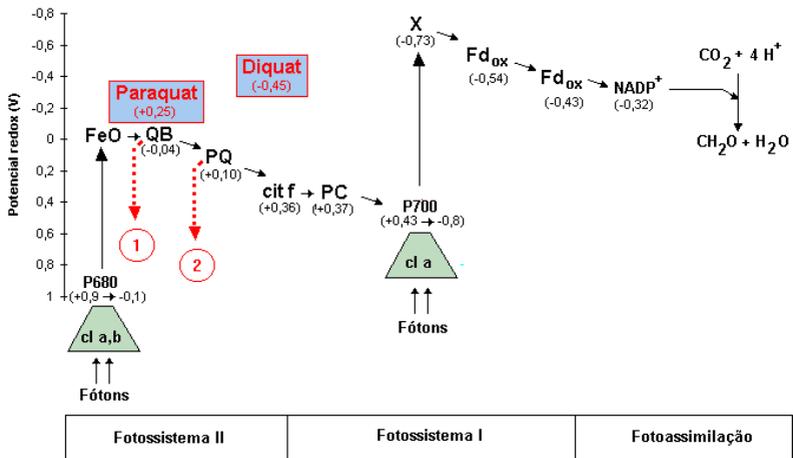


Figura 2. Representação simplificada dos potenciais redox dos constituintes da cadeia de transporte de elétrons do cloroplasto, mostrando a posição relativa dos intermediários e do diquat e paraquat. O fluxo de elétrons ocorre na direção do menor potencial redox, e é por este fato que os bupiridíliuns são capazes de funcionar como falsos aceptores, desviando o fluxo de elétrons. São mostrados ainda os sítios de atuação de alguns inibidores do fotossistema II - o dos derivados da uréia (1) e o do DBMIB (2).

A interceptação de elétrons no fotossistema I paralisa a redução da ferredoxina e as reações subsequentes descritas na Figura 3. A morte das plantas, no entanto, resulta de uma soma de numerosos processos que ocorrem em função da perda do estado de equilíbrio bioquímico natural pela perda de substâncias reduzidas. Uma série de reações de oxidação, produção de radicais livres (em função do ambiente oxidante que é o ar),

disrupção de membranas, oxidação de clorofilas e uma gama de respostas secundárias pode ser observada à medida que progride a intoxicação das plantas.

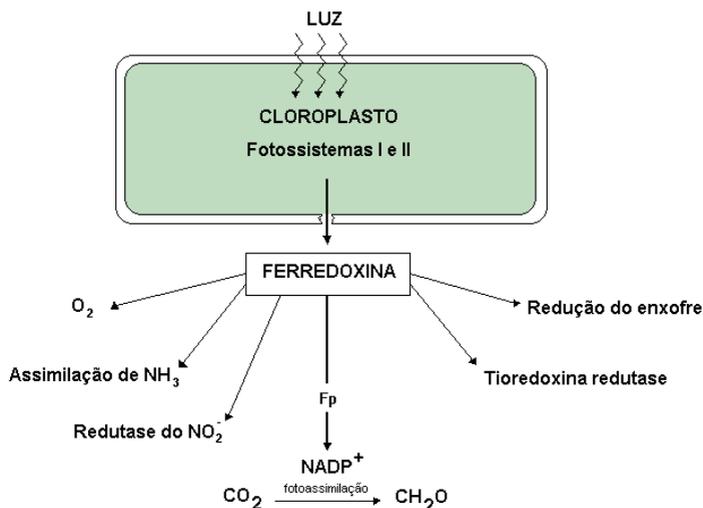


Figura 3. Reações metabólicas de transferência de elétrons em que a ferredoxina está envolvida e que são bloqueadas após o desvio do fluxo de elétrons pelos bupiridíliuns nos cloroplastos. Fp = flavoproteína. Adaptado de [Bartels \(1985b\)](#).

Resumidamente, a morte das plantas ocorre pela perda de fotossíntese dos tecidos afetados, pela destruição dos ácidos graxos nos tilacóides e outras membranas celulares próximos aos locais de produção de radicais livres, e pelo dano que estes radicais livres causam às células, levando à clorose, necrose e morte.

4.3 Seletividade

De modo geral, não são seletivos. Nos Estados Unidos, algumas espécies de amendoim e de *Agropyron repens* foram selecionadas por serem tolerantes ao paraquat, possivelmente em função do aumento dos teores das enzimas superóxido-dismutase, catalase e peroxidase, as quais transformam o H₂O₂ produzido em compostos não prejudiciais às plantas.

No entanto, é possível usar estes herbicidas de modo seletivo por meio de aplicações dirigidas em pós-emergência, nas quais seja evitado o contato do jato pulverizado com as folhas da cultura.

4.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Bipiridíliuns	Diquat Dicloreto de paraquat Paraquat	Reglone Gramoxone, Helmoxone, Paradox Laredo, Paraquat Sinon

Principais misturas:

- Bentazon+dicloreto de paraquat: Pramato
- Dicloreto de paraquat+paraquat: Tocha
- Diuron+dicloreto de paraquat: Gramocil

5. Inibidores do Crescimento Inicial – Grupos K1⁽³⁾; K2⁽²³⁾ e K3⁽¹⁵⁾

5.1 Subgrupo K1⁽³⁾: inibidores da formação de microtúbulos (dinitroanilinas e piridinas)

Dependendo da classificação, este subgrupo pode aparecer como um mecanismo distinto do subgrupo K3. Eventualmente pode ser encontrada a denominação de “inibidores da polimerização da tubulina” para agrupar estes herbicidas.

Benzamidas, derivados do ácido benzóico (DCPA), dinitroanilinas, fosforoamidatos e piridinas são exemplos de grupos químicos de herbicidas que se ligam à tubulina, proteína mais importante na formação dos microtúbulos. O complexo herbicida-tubulina inibe a polimerização dos microtúbulos, levando à desconfiguração física e perda de função. Em consequência, o fuso mitótico não ocorre, causando a falta de alinhamento e separação dos cromossomos durante a mitose. Além disto, a chamada placa equatorial não se forma. Os microtúbulos também possuem função na formação da parede celular. A perda de microtúbulos induzida pela presença de herbicidas pode causar o sintoma de entumescimento de extremidades de raízes, que ocorre nos tecidos meristemáticos uma vez que eles não se dividem nem conseguem se alongar (Senseman, 2007).

5.1.1 Características gerais

1. Causam a paralização do crescimento da raiz e da parte aérea de plântulas e podem causar a morte do meristema apical;

2. Plantas daninhas perenes e anuais já estabelecidas só morrem em casos especiais, uma vez que as dinitroanilinas e piridinas não se translocam nas plantas e apresentam pouca ou nenhuma atividade na parte aérea de plantas já estabelecidas;
3. Resistência à lixiviação no solo vai de moderada a alta;
4. Apresentam características químicas e físicas que favorecem seu desaparecimento rápido do solo (alta pressão de vapor, fotólise, decomposição microbiana);
5. Todos apresentam baixa toxicidade para mamíferos;
6. Espectro de controle: são especialmente eficientes no controle de gramíneas, oriundas de sementes, com pouco ou nenhum controle de folhas largas;
7. São utilizados em PRÉ ou PPI, devido à alta pressão de vapor.

5.1.2 Modo de ação

São considerados inibidores da mitose, mais especificamente da formação de microtúbulos. Especialmente nas primeiras décadas de uso mais intenso de herbicidas no Brasil (décadas de 70 e 80), trifluralin foi um dos herbicidas mais intensivamente usados para o controle de plantas daninhas em muitas culturas. A ação do trifluralin sobre plantas sensíveis causa a inibição da mitose na prometáfase, pela interferência na polimerização da tubulina e na formação de microtúbulos (Hess & Bayer, 1974, 1977). A nível citológico, o trifluralin altera o padrão normal da mitose. Anormalidades mitóticas, como metáfases desorganizadas, células poliplóides e micronúcleos são observadas após o tratamento com o herbicida em cebola, trigo e milho (Lignowski & Scott, 1972; Oliveira et al., 1996).

O efeito do trifluralin não envolve, necessariamente, a inibição da germinação de sementes (Parks & Soper, 1977), mas invariavelmente causa a inibição do crescimento radicular (Lignowski & Scott, 1972), caracterizando-se, sob o aspecto morfológico, pelo entumescimento das pontas de raízes sensíveis, o qual está associado à redução ou paralisação da divisão celular, embora a expansão radial das células se mantenha (Hartzler et al., 1990).

Para o thiazopyr, embora atue de modo muito semelhante às dinitroanilinas, existem evidências de que este herbicida não se liga à mesma proteína (tubulina).

5.1.3 Seletividade

A localização espacial do produto no solo (seletividade de posição) é o principal modo por meio do qual algumas espécies são sensíveis e outras tolerantes. Em cenoura (altamente tolerante a dinitroanilinas) a resistência encontra-se no sítio de atuação devido a diferenças na estrutura da tubulina.

5.2 Subgrupo K3⁽¹⁵⁾: inibidores da divisão celular (cloroacetamidas)

Este subgrupo pode, por vezes, ser referenciado também como um mecanismo à parte. Primeiramente este grupo foi denominado de inibidores do crescimento da parte aérea. Mais recentemente, foram denominados de inibidores da síntese de ácidos graxos de cadeia muito longa (ou, em inglês, inibidores de VLCFA – *Very Long Chain Fatty Acids*), ou, simplesmente inibidores da divisão celular. O alachlor foi o primeiro herbicida deste grupo químico a ser comercializado, tendo um grande impacto na agricultura da época, uma vez que era um herbicida que podia ser usado tanto em soja quanto em milho com um amplo espectro de ação (gramíneas e folhas largas), sem necessidade de incorporação ao solo (como o trifluralin, seu competidor na época). Herbicidas deste grupo proporcionam controle de gramíneas e de algumas dicotiledôneas e são usados em culturas como milho, soja, batata, feijão, amendoim, algodão, fumo e cana-de-açúcar. Além das cloroacetamidas, compõem este subgrupo as acetamidas, oxiacetamidas e tetrazolinonas.

5.2.1 Características gerais

1. Controlam sementes em germinação e plântulas bem pequenas já emergidas de gramíneas anuais e de algumas poucas folhas largas (Ex: caruru). São aplicados normalmente em pré-emergência;
2. Aparentemente são absorvidos tanto pelas raízes (especialmente nas dicotiledôneas) quanto pela parte aérea (principalmente nas mono), mas a translocação é pequena;
3. Toxicidade para peixes, aves e mamíferos é bastante baixa;
4. Um ou mais produtos deste grupo possuem registro no Brasil para culturas como algodão, amendoim, café, cana, feijão, girassol, milho e soja. Nenhum precisa ser incorporado, mas uma leve incorporação aumenta a eficiência destes produtos;
5. Em função do uso contínuo em áreas de milho por muitos anos, existem inúmeros relatos de casos de contaminação do lençol freático nos Estados Unidos por lixiviação destes herbicidas, principalmente de alachlor e metolachlor.

5.2.2 Modo de ação

Apesar de sua importância para a agricultura, pouco se sabe sobre o mecanismo de ação destes herbicidas. A ação fitotóxica destes herbicidas acontece pela inibição da síntese de proteínas (provavelmente várias) nos meristemas apicais da parte aérea e das raízes em espécies susceptíveis. Esta inibição resulta na paralisação da divisão celular, aumento de tamanho das células, causando a inibição do crescimento da raiz e da parte

aérea. Também afetam a alongação foliar, a síntese de lipídeos e a formação da cutícula foliar (University of Minnesota, 2009). Gramíneas mostram inibição da emergência da folha primária do coleóptilo.

Pode haver maior injúria nas plantas sob condições severas de clima (frio, umidade, chuvas) antes da emergência, em função do aumento na absorção (University of Minnesota, 2009).

5.2.3 Seletividade

Pode estar relacionada à taxa de metabolismo, mas isto ainda não está totalmente comprovado. O uso de *safeners* (protetores) tem sido desenvolvido para este grupo para uso de alachlor e metolachlor em sorgo granífero.

Algumas espécies tolerantes ao alachlor conseguem conjugar uma pequena proteína produzida nas plantas à molécula do herbicida, tornando-o inativo. Este metabolismo de degradação é muito similar ao modo como atrazine é detoxificado pelas plantas (University of Minnesota, 2009). Em certos casos a seletividade de posição também é importante para separar espécies tolerantes de espécies susceptíveis.

5.3 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Subgrupo K1⁽³⁾		
Dinitroanilinas	Pendimethalin	Herbadox, Pendimethalin Sanachem, Pendulum
	Trifluralin	Arrow, Canastra, Herbiflan, Lifalin, Novolate, Premerlin, Trifluralina Atanor, Trifluralina Milenia, Trifluralina Nortox, Trifluralina Nortox Gold, Triflurex, Tritac
Piridinas	Thiazopyr	Visor
Subgrupo K3⁽¹⁵⁾		
Cloroacetamidas	Acetochlor	Fist, Kadett, Surpass
	Alachlor	Alaclor Nortox, Alanex, Laço
	S-metolachlor	Dual Gold

Principais misturas:

- Alachlor+trifluralin: Lance
- Alachlor+atrazine: Agimix, Alaclor+Atrazina Nortox, Alazine, Bo-xer

- Atrazine+s-metolachlor: Primagram Gold, Primaiz, Primestra Gold
- Propanil+thiobencarb: Grassmax, Satanil

Outros herbicidas do grupo K1 e seus respectivos grupos químicos são benefin, dinitramine, oryzalin (dinitroanilinas), amiprofos-methyl, butaminophos (fosforoamidatos), dithiopyr (piridinas), propyzamide, tebutam (benzamidas) e chlortal ou DCPA (ácido benzóico). No grupo K2 encontram-se carbetamide, chlorpropham e propham (carbamatos). No grupo K3 estão butachlor, dimethachlor, dimethenamid, metazachlor, metolachlor, pethoxamid, pretilachlor, propachlor (cloroacetamidas), diphenamid, naproanilide, napropamide (acetamidas), flufenacet, mefenacet (oxiacetamidas), ipfencarbazone, fentrazamide (tetrazolinonas), anilofos, cafenstrole, pyroxasulfone e piperophos (outros grupos químicos). Dimethachlor, dimethanamid, metazachlor, metolachlor, pethoxamid, pretilachlor, propachlor, propisochlor e thenylchlor são também incluídos no grupo K3, mas sem grupo químico definido.

6. Inibidores da PROTOX – Grupo E⁽¹⁴⁾

Este grupo é composto por herbicidas cujo mecanismo de ação inibe a atuação da enzima protoporfirinogênio oxidase (PPO ou PROTOX). São também denominados inibidores da síntese do tetrapirrole ou inibidores da síntese de protoporfirina IX.

6.1 Características gerais

1. Podem ser absorvidos pelas raízes, caule ou folhas de plantas novas;
2. Geralmente apresentam pouca ou nenhuma translocação nas plantas;
3. Requerem luz para serem ativados;
4. Partes das plantas expostas aos produtos e à luz morrem rapidamente (um a dois dias);
5. São altamente sorvidos pela matéria orgânica do solo e altamente resistentes à lixiviação;
6. Devido aos dois itens anteriores, quando aplicados em pré-emergência, a atuação ocorre próximo à superfície do solo, durante a emergência das plantas;
7. O período residual no solo varia consideravelmente entre herbicidas. Casos eventuais de *carryover* foram observados com a utilização de fomesafen e sulfentrazone.

6.2 Modo de ação

O mecanismo de ação dos produtos deste grupo parece estar relacionado com a inibição da enzima protoporfirinogênio oxidase (PPO ou PROTOX), que atua na oxidação de protoporfirinogênio à protoporfirina IX (precursores da clorofila). Com a inibição da enzima, ocorre o acúmulo de protoporfirinogênio, que se difunde para fora do centro reativo, onde acontece uma oxidação não-enzimática da mesma. Cogita-se que a protoporfirina IX produzida pela via não enzimática não sofreria a atuação da Mg-quelatase para transformar-se em Mg-protoporfirina IX, e, ou, que teria uma conformação estrutural diferente daquela produzida pela via normal. Neste caso, ocorreria a interação entre oxigênio e luz para levar o O₂ ao estado singlet, o qual seria responsável, em última instância, pela peroxidação de lipídeos observada nas membranas celulares. Lipídeos e proteínas são oxidados, resultando em perda da clorofila e carotenóides e no rompimento das membranas, o que faz com que as organelas desidratem e se desintegrem rapidamente.

Quando aplicados em pré-emergência, estes herbicidas causam a morte das plantas quando estas entram em contato com a camada de solo tratada. Os tecidos sensíveis sofrem rapidamente necrose e morte, causados pela peroxidação de lipídeos.

Plantas susceptíveis apresentam necrose nas folhas rapidamente (um a três dias). Mesmo em espécies consideradas tolerantes, as plantas podem exibir injúrias de moderadas a severas após a aplicação destes herbicidas em pós-emergência. Doses subletais podem produzir sintomas de bronzeamento das folhas mais novas, ao passo que a deriva de pequenas gotas causa o aparecimento de pequenas manchas brancas nas folhas.

6.3 Seletividade

Quando em contato direto com a folhagem apresentam pouca seletividade. No entanto, muitas culturas tem capacidade de rapidamente recuperar a área foliar afetada (ex: lactofen e acifluorfen aplicados em soja) ocorre certo nível de injúria, mas as plantas se recuperam (o efeito é unicamente de contato, as folhas novas que saem após a aplicação não são afetadas).

Para o oxyfluorfen, em espécies como *Pinus* sp. e cebola, a tolerância aumenta com a idade devido ao menor molhamento e menor penetração via foliar, os quais ocorrem em função da maior deposição de cera cuticular. Em alguns casos, a seletividade só é obtida por meio de aplicações dirigidas às entrelinhas (café, citros).

Herbicidas como o flumioxazin e o carfentrazone, isolados ou em misturas com outros herbicidas como glyphosate e 2,4-D, podem ser utilizados em operações de dessecação pré-plantio, em áreas de semeadura direta, normalmente com o intuito de acelerar o efeito de dessecação ou de melhorar o controle sobre plantas daninhas específicas (Jaremtchuk et al., 2008).

6.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Difeniléteres	Fomesafen	Flex
	Lactofen	Cobra, Coral, Drible, Lactofen
	Oxyfluorfen	AGP, Naja, Serpent
N-fenilftalimidas	Flumiclorac-pentil	Galigan, Goal
	Flumioxazin	Radiant, Resource
Oxadiazóis	Flumyazin	Flumyazin, Sumisoya, Sumyzin
	Oxadiazon	Ronstar
Triazolinonas	Carfentrazone-ethyl	Affinity, Aim, Aurora, Quicksilver, Rage, Spotlight
	Sulfentrazone	Boral, Explorer, Solara
Pirimidinadionas	Saflufenacil	Kixor, Heat

Principais misturas:

- Fluzifop-p-butyl+fomesafen: Fusiflex, Robust

Outros herbicidas e respectivos grupos químicos: acifluorfen-sódio, aclonifen, bifenox, chlomethoxyfen, ethoxyfen, fluoroglycofen, halosafen (difeniléteres), flutiacet-methyl, thidiazimim (thiadizoles), fluazolate, pyraflufen-ethyl (phenylpirazoles), azafenidim, bencarbazone (triazolinona), cinidon-ethyl (N-fenilftalimida), oxadiargyl (oxadiazol), pentoxazone (oxazolidinediona), benzfendizone, butafenacil (pirimidinadionas), flufenpyr-ethyl, profluzol, pyraclonil (outros).

7. Inibidores da Biossíntese de Carotenóides – Grupos F1⁽¹²⁾; F2⁽²⁷⁾ e F3^(11,13)

Este grupo de mecanismo de ação caracteriza-se principalmente pelo sintoma de injúria comum, caracterizado pela despigmentação das folhas ocasionada pela fotodegradação da clorofila que ocorre após o bloqueio da síntese dos pigmentos carotenóides, o que explica serem frequentemente chamados de *bleachers*. Subdivide-se em três conjuntos de herbicidas, que diferem entre si em função do sítio de atuação no bloqueio dos pigmentos carotenóides (Figura 4), mas que apresentam em comum o mesmo típico sintoma de injúria nas plantas.

O clomazone, o primeiro herbicida importante deste grupo, foi descoberto pela FMC em 1984 e usado pela primeira vez no estado americano de Iowa, em 1986. Um outro aspecto interessante relacionado a herbicidas deste grupo diz respeito ao isoxaflutole, cuja atuação no controle das plantas daninhas depende da sua conversão à diquetonitrila. Este fato faz com que o isoxaflutole seja considerado um pró-herbicida.

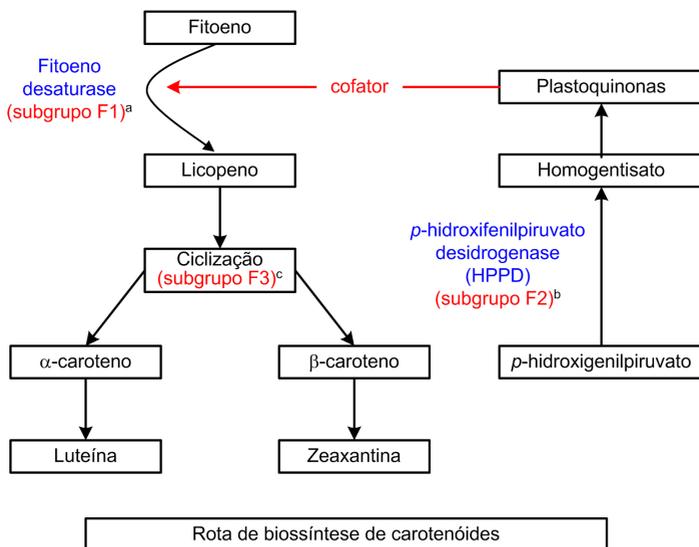


Figura 4. Sítios de atuação dos herbicidas inibidores da síntese de carotenóides. Adaptado de [Retzinger Jr. & Mallory-Smith \(1997\)](#).

^a Subgrupo F1: nenhum herbicida registrado para uso no Brasil.

^b Subgrupo F2: isoxaflutole, mesotrione, tembotrione.

^c Subgrupo F3: clomazone.

7.1 Características gerais

1. Estes herbicidas resultam na perda de praticamente todos os pigmentos das folhas das plantas susceptíveis, resultando numa aparência “albina”;
2. Amitrole (atualmente não registrado para uso no Brasil) é prontamente translocado tanto pelo xilema quanto pelo floema, mas os demais translocam-se apenas pelo xilema;
3. Quando aplicados em pré-emergência, norflurazon, fluridone e clomazone podem danificar culturas vizinhas por deriva; o potencial para deriva é maior quando estes herbicidas não são incorporados ao solo;
4. No solo, o principal fator que determina a sorção é a matéria orgânica, sendo que a influência da textura é secundária e o pH praticamente não influi. A decomposição acontece basicamente pela atividade de microrganismos do solo, com hidrólise e fotólise desempenhando papéis secundários;
5. Todos apresentam baixa toxicidade para mamíferos.

7.2 Modo de ação

Considera-se que herbicidas deste grupo atuam de maneira geral em alguns sítios enzimáticos da rota da síntese dos pigmentos carotenóides. O bloqueio da síntese destes pigmentos é o fenômeno responsável pelo surgimento do sintoma característico de “albinismo” ou despigmentação.

No primeiro subgrupo (F1⁽¹²⁾) encontram-se as piridazinonas (norflurazon), as piridinecarboxamidas (diflufenican, picolinafen) e o fluridone, os quais são exemplos de herbicidas que bloqueiam a síntese de carotenóides pela inibição da fitoeno desaturase. Sua inibição causa o acúmulo de fitoeno, fenômeno já observado para produtos como o fluridone (Kowalczyk-Schröder & Sandmann, 1992) e norflurazon (Sandmann & Böger, 1989).

Tricetonas, isoxazoles e pirazoles (F2⁽²⁷⁾) são exemplos de herbicidas que inibem outra enzima, a *p*-hidroxifenilpiruvato desidrogenase (HPPD), que é a responsável pela conversão do *p*-hidroximetilpiruvato à homogentisato. Esta é uma reação-chave na síntese de plastoquinona e sua inibição dá início aos sintomas de branqueamento nas folhas que emergem após a aplicação. Estes sintomas resultam de uma inibição indireta da síntese de carotenóides devido ao envolvimento da plastoquinona como cofator da fitoeno desaturase (Senseman, 2007).

O sítio de atuação específico das isoxazolidinonas (F3⁽¹³⁾) não é bem conhecido. O clomazone parece ter um sítio de atuação singular, uma vez que não causa o acúmulo do fitoeno (Duke & Kenyon, 1986) nem inibe a biossíntese de geranylgeranyl pirofosfatase (Weimer, 1992). Foi proposto que o ponto exato de atuação seria a IPP isomerase (isopentenil pirofosfato isomerase), o que foi posteriormente descartado (Croteau, 1992; Weimer et al., 1992). Evidências recentes sugerem que o clomazone é metabolizado para a forma 5-ceto-clomazone pelas hemoproteínas do sistema citocromo P-450 monooxigenase, tornando-se ativa como herbicida (Yun et al., 2005). A forma 5-ceto inibe a 1-deoxi-xilulose 5-fosfatase sintase (DOXP), um composto-chave para a síntese de isoprenóides dos plastídeos (Ferhatoglu & Barret, 2006).

Amitrole (F3⁽¹¹⁾) (triazol) inibe o acúmulo de clorofila e de carotenóides na presença de luz, embora o sítio específico de atuação não tenha sido determinado. Aclonifen (F3⁽¹¹⁾) (difeniléter) parece atuar de forma semelhante aos inibidores da síntese de carotenóides, mas o mecanismo exato de ação também não está elucidado.

O sintoma mais visível que resulta do tratamento de plantas com herbicidas que inibem a biossíntese de carotenóides é a folhagem totalmente branca produzida após o tratamento. Às vezes isto é chamado de “crescimento albino”. O crescimento ainda continua por algum tempo, mas sem a produção de tecidos fotossintéticos verdes, o crescimento das plantas afetadas não pode ser mantido. O crescimento cessa e então começam a aparecer os sintomas de necrose. Os herbicidas que inibem a biossíntese de carotenóides não afetam os carotenóides pré-existentes. Portanto

os tecidos formados antes do tratamento não mostram os sintomas albinos típicos.

Embora o crescimento das partes novas seja branco, estes herbicidas não inibem diretamente a biossíntese de clorofila. A perda de clorofila é o resultado da destruição dela pela luz (fotooxidação), ou talvez devido à falta de carotenóides indiretamente causando a disrupção indireta da biossíntese normal de clorofila e do desenvolvimento do cloroplasto. Um papel importante dos carotenóides é o de proteger a clorofila da fotooxidação. Depois da clorofila ser sintetizada e se tornar eletronicamente excitada pela absorção de fótons de luz, é transformada da forma singlet para a forma triplet, mais reativa. Normalmente a energia desta forma reativa de clorofila é dissipada por meio dos carotenóides. Quando os carotenóides não estão presentes, estas clorofilas no estado triplet iniciam reações de degradação, entre as quais está a destruição da clorofila. Portanto, sem a presença dos carotenóides, as clorofilas não são capazes de se manterem funcionais e estáveis.

7.3 Seletividade

- Clomazone: é seletivo para arroz, algodão, batata, cana, fumo, mandioca, pimentão e soja. No caso do algodão e do arroz, a tolerância ao clomazone por estas culturas é conferida pela inibição da enzima Citocromo P-450 monoxigenase presente nas células do mesófilo, por meio do uso de protetores como o dietholate e outros inseticidas organofosforados. Os protetores são responsáveis pela diminuição da atividade do citocromo, evitando que o clomazone seja transformado na forma ativa (5-ceto clomazone) (Ferhatoglu et al., 2005). No caso da soja, a seletividade do clomazone também pode estar relacionada a um somatório de outros fatores secundários, como hidroxilação, rompimento da cadeia no radical -N-CH₂, conjugação com metabólitos, metabolismo mais intenso e menor translocação para os locais de atuação.
- Norflurazon é seletivo para cana, citros e algodão, mas não é registrado para uso no Brasil. É seletivo para algodão apenas em aplicações em pré-emergência ou pré-plantio incorporado. Pode ser utilizado em aplicação dirigida em frutíferas. Isoxaflutole possui registro para uso em algodão, bata, cana, eucalipto, mandioca, milho e *Pinus* sp. Em ambos os casos as informações disponíveis sobre a seletividade destes herbicidas para culturas são limitadas.
- Translocação muito reduzida (ex: fluridone e norflurazon em algodão);

7.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Subgrupo F2⁽²⁷⁾		
Isoxazoles	Isoxaflutole	Fordor, Provence
Tricetonas	Mesotrione	Callisto
	Tembotrione	Soberan
Subgrupo F3⁽¹³⁾		
Isoxazolidinonas	Clomazone	Clomanex, Clomazone, Commence, Escudo, Gamit, Gamit Star, Magister, Reator

Principais misturas:

- Ametryne+clomazone: Sinerge
- Clomazone+hexazinone: Discover, Ranger

Herbicidas inibidores da fitoeno desaturase (F1) incluem beflubutamid, diflufenican, fluridone, flurochloridone, flurtamone, norflurazon e picolinafen, embora nenhum deles apresente registro para uso no Brasil. Em relação ao subgrupo F2, outros herbicidas incluem benzofenap, pyrasulfotole, isoxachlortole, pyrazolynate, pyrazoxifen, tefuryltrione, topramezone, sulcotrione, benzobicyclon e bicyclopyrone. Por fim, amitrole e fluometuron também são classificados como F3.

8. Inibidores da ACCase – Grupo A⁽¹⁾

Grupo de herbicidas também denominado de inibidores da síntese de lipídeos, ou inibidores da síntese de ácidos graxos. Compreendem dois grupos químicos, que, embora quimicamente diferentes, apresentam grande semelhança em termos de espectro de controle, eficiência, seletividade e modo de ação. Os ariloxifenoxipropionatos (APPs) foram introduzidos no final da década de 70 e as ciclohexanodionas (CHDs) durante a década de 80.

8.1 Características gerais

1. São considerados herbicidas sistêmicos, controlando tanto gramíneas anuais quanto perenes, embora a tolerância varie entre espécies. Espécies não gramíneas (tanto plantas daninhas quanto culturas) são normalmente bastante tolerantes;
2. As doses utilizadas em pós-emergência geralmente são baixas, embora o controle de gramíneas perenes requiera doses mais elevadas.

A penetração nas plantas ocorre basicamente por via foliar. Possuem atividade no solo baixa ou nula, não sendo utilizados nesta modalidade de aplicação;

3. Possuem considerável flexibilidade quanto à época de aplicação. O estágio mais sensível das gramíneas é entre 3 a 5 folhas, mas plantas maiores podem ainda ser controladas. Dentro de certos limites, a taxa de crescimento das gramíneas por ocasião da aplicação pode ser mais importante do que o estágio de desenvolvimento;
4. Eventualmente pode ocorrer algum antagonismo quando estes gramínicidas aplicados em pós-emergência são misturados em tanque com outros herbicidas latifolicidas (ex: diclofop+2,4-D; sethoxydim ou fluazifop com bentazon ou acifluorfen), caracterizado pela redução na porcentagem de controle das gramíneas;
5. Casos de resistência a herbicidas deste mecanismo de ação já foram descritos em vários países, inclusive no Brasil;
6. Na maioria dos casos, são aplicados em mistura com adjuvantes, visando ao aumento da absorção e, ou da translocação nas plantas.

8.2 Modo de ação

Em 1987 foi demonstrado que o local de ação destes herbicidas era a acetil-coenzima A carboxilase (ACCase). Esta enzima, encontrada no estroma dos plastídeos, converte acetil coenzima A (acetil co-A) à malonil-coenzima-A (malonil co-A), através da adição de CO_2 (HCO_3^-) à acetil co-A, no primeiro passo do processo de biossíntese dos ácidos graxos. A inibição da síntese de ácidos graxos bloqueia a produção de fosfolípidos usados na construção de novas membranas necessárias para o crescimento celular.

O crescimento das plantas sensíveis cessa logo após a aplicação. Os primeiros sintomas do efeito herbicida em plantas sensíveis são notados inicialmente na região meristemática, onde a síntese de lípidos para a formação de membranas é muito intensa. Em gramíneas, os meristemas (próximos aos entrenós) sofrem descoloração, ficam marrons e desintegram-se. As folhas recém-formadas ficam cloróticas e morrem entre uma e três semanas após o tratamento. Folhas mais desenvolvidas podem adquirir coloração arroxeada ou avermelhada, lembrando sintomas de deficiência de fósforo (Vidal, 1997).

8.3 Seletividade

O mecanismo de seletividade entre espécies dicotiledôneas e gramíneas ocorre em nível de sítio de atuação (insensibilidade da ACCase). Nenhuma diferença significativa na absorção, translocação ou metabolismo tem sido demonstrada entre estas plantas (Dan Hess, 1994c). De forma análoga, a

tolerância natural de algumas gramíneas parece ocorrer em função de uma forma menos sensível da ACCase.

8.4 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Ariloxifenoxipropionatos (APPs) (“fops”)	Cyhalofop-butyl	Clincher
	Clodinafop-propargyl	Topik
	Diclofop-methyl	Iloxan
	Fenoxaprop-p-ethyl	Podium EW, Rapsode, Starice, Whip S
	Fluazifop-p-butyl	Fusilade
	Haloxyfop-p-methyl	Gallant, Verdict
	Propaquizafop	Acert
	Quizalafop-p-ethyl	Targa
Ciclohexanodionas (CHDs) (“dims”)	Quizalafop-p-tefuryl	Panther
	Clethodim	Centurion, Lord, Poquer, Select
	Profoxydim	Aura
	Sethoxydim	Poast, Poast Plus
	Tepraloxym	Aramo

Principais misturas:

- Clethodim+fenoxaprop-p-etyl: Podium S, Seifen
- Fluzifop-p-butyl+fomesafen: Fusiflex, Robust

Outros herbicidas destes dois grupos químicos são fenoxaprop-ethyl, metamifop (ariloxifenoxipropionatos), alloxydim, butroxydim, cycloxydim, profoxydim e tralkoxydim (ciclohexanodionas). Um terceiro grupo químico, denominado de fenilpirazolinias, apresenta um único herbicida denominado pinoxaden.

9. Inibidores da ALS – Grupo B⁽²⁾

Em algumas referências, é possível encontrar a denominação “inibidores da síntese de aminoácidos” para o conjunto formado pelos herbicidas inibidores da ALS, inibidores da ESPS sintase e inibidores da glutamina sintetase (Figura 5). No entanto, o conceito de que se tratam de mecanismos de ação distintos é o mais aceito, sendo a forma utilizada neste texto.

Os herbicidas classificados neste mecanismo de ação constituem um dos mais importantes grupos de herbicidas atualmente comercializados. Grande parte das novas moléculas lançadas nos últimos anos ou em fase de desenvolvimento estão compreendidas neste mecanismo de ação.

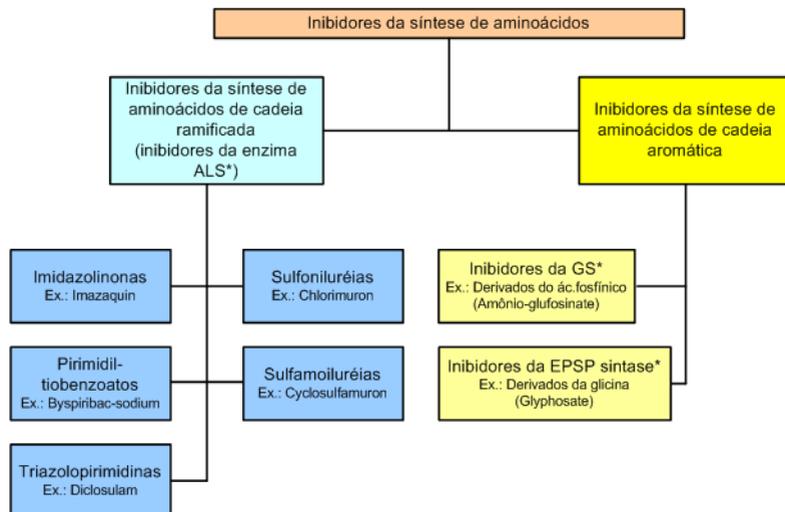


Figura 5. Organograma mostrando os diferentes grupos químicos que inibem a síntese de aminoácidos (* Abreviaturas das enzimas: ALS = acetolactato sintase; GS = glutamina sintetase; EPSP sintase = 5-enolpiruvilchiquimat o-3-fosfato sintase).

Imidazolinonas, pirimidinil(tio)benzoatos, sulfonilaminocarbonitriazolinonas, sulfoniluréias e triazolopirimidinas são grupos químicos que inibem a acetolactato sintase (ALS). A morte das plantas resulta de eventos que ocorrem em função da inibição da ALS e da produção de aminoácidos de cadeia ramificada, embora a sequência exata de acontecimentos seja ignorada.

Os inibidores da ALS têm sido intensivamente utilizados em função da alta eficiência em doses muito baixas, baixa toxicidade para mamíferos e boa seletividade para várias das culturas de grande importância econômica. A combinação do uso generalizado e da facilidade com que plantas daninhas desenvolvem resistência a este grupo resultou na seleção de um grande número de espécies resistentes aos inibidores da ALS, em diversos países. Novos casos de resistência têm surgido neste grupo em maior número do que em qualquer outro nos últimos anos.

Em função da importância e do número de herbicidas que são classificados neste grupo, as imidazolinonas, sulfoniluréias e as triazolopirimidinas são detalhadas a seguir.

9.1 Imidazolinonas

9.2 Características gerais

Esta classe de herbicidas foi descoberta pelos cientistas da American Cyanamid Company durante a década de 70. Em função de sua versatilidade, baixa toxicidade e segurança ambiental, estes herbicidas têm sido usados em muitas culturas e desempenharam papel fundamental na produção de alimentos e fibras no mundo todo.

As imidazolinonas e as sulfoniluréias, embora quimicamente diferentes, atuam no mesmo sítio de ação (Figura 6) e geralmente produzem sintomas de fitotoxicidade similares nas plantas susceptíveis. Ambos os grupos são efetivos em doses muito baixas ($< 0,15 \text{ kg ha}^{-1}$), e a maioria é altamente seletiva, controlando um largo espectro de folhas largas de ciclo anual. Herbicidas do grupo das imidazolinonas apresentam incompatibilidade física com misturas em tanque com 2,4-D.

9.2.1 Toxicidade

Os resultados de muitos estudos a respeito do potencial de toxicidade das imidazolinonas demonstram que estas moléculas tem um baixo potencial toxicológico, em parte porque elas agem inibindo um processo biossintético num sítio presente apenas nas plantas. A acetolactato sintase (ALS), enzima sobre a qual atuam estes herbicidas, não ocorre nos animais, os quais dependem das plantas para a ingestão dos aminoácidos produzidos pela atuação da enzima (leucina, isoleucina e valina). Desta forma, a toxicidade destes produtos torna-se específica para as plantas. Além disto, resultados obtidos com cobaias estudadas em laboratório demonstram que estes herbicidas são excretados rapidamente por ratos, antes que eles possam se acumular em tecidos ou no sangue.

9.2.2 Comportamento no ambiente

Na água, a hidrólise é extremamente lenta em condições normais de pH e temperatura. Ao contrário, a fotólise destes produtos na água é extremamente rápida. Perdas por volatilização são desprezíveis.

A persistência das imidazolinonas no solo é influenciada pelo grau de sorção ao solo, umidade, temperatura e exposição à luz solar (Renner et al., 1988; Mangels, 1991). O grau de sorção ao solo aumenta com a elevação do teor de matéria orgânica e a redução do pH (Loux et al., 1989; Che et al., 1992) e com o teor de argila e de hidróxidos de ferro e alumínio presentes (O'Bryan et al., 1994).

O movimento das imidazolinonas é muito influenciado por diversas propriedades químicas do solo. As mais importantes são pH e matéria orgânica, com o teor de argila tendo um papel secundário. Uma vez que a maioria dos solos brasileiros são ácidos, e as suas superfícies tornam-se mais ácidas à medida que o nível de umidade decresce, a mobilidade no perfil do solo é limitada.

A degradação microbiana sob condições aeróbicas é o principal mecanismo de degradação, com uma pequena contribuição da fotólise. As condições que tendem a favorecer a atividade microbiana, como temperatura elevada e solos úmidos, são também as condições climáticas nas quais as imidazolinonas são mais rapidamente degradadas (Goetz et al., 1990; Loux & Reese, 1992). Fatores que limitem a degradação microbiana podem, eventualmente, levar ao aparecimento de injúrias em culturas em rotação (Monks & Banks, 1991; Moyer & Esau, 1996).

Em função de sua persistência no solo, os herbicidas deste grupo utilizados na cultura da soja apresentam restrições quanto à semeadura de algumas culturas de “safrinha” em rotação após a soja (Silva et al., 1999; Oliveira Jr., 2001; Dan et al., 2010). A recomendação de bula sugere que não se cultive milho “safrinha” após a utilização de imidazolinonas, principalmente o imazaquin, após sua utilização em soja no verão.

9.2.3 Modo de ação

Nas plantas susceptíveis, as imidazolinonas e as sulfoniluréias inibem a mesma enzima – a ALS (Stidham, 1991). Esta enzima atua na síntese de três aminoácidos de cadeia ramificada: leucina, lisina e isoleucina (Figura 6). Em plantas susceptíveis, ocorre a paralisação do crescimento e desenvolvimento de clorose internerval e, ou arroxamento foliar dentro de 7 a 10 dias após a aplicação do herbicida. Folhas em emergência podem aparecer manchadas e mal formadas. Pode também haver inibição do crescimento de raízes laterais quando resíduos do produto estão presentes no solo. Normalmente, nas folhas largas, o meristema apical necrosa e morre antes que as demais partes mais velhas da planta.

9.2.4 Seletividade

O mecanismo primário de seletividade natural às imidazolinonas é a capacidade das espécies de metabolizar os herbicidas a metabólitos não tóxicos; a absorção e translocação influenciam pouco a tolerância.

9.3 Sulfoniluréias

9.3.1 Características gerais

A família das sulfoniluréias foi descoberta e desenvolvida inicialmente pela DuPont a partir de 1975. O primeiro produto comercializado foi o chlorsulfuron (não registrado para uso no Brasil), em 1981. Caracteriza-se por ser um grupo de herbicidas que tem altos níveis de atividade em baixas doses de aplicação. É possivelmente o grupo de herbicidas com maior número de novos produtos de desenvolvimento recente.

As moléculas deste grupo, em geral, são ativas tanto através da via foliar quanto via solo, translocando-se via apoplasto e simplasto; existe

também uma grande diversidade de interações com culturas e plantas daninhas, o que resulta em diferentes especificidades dos produtos em termos de seletividade, época de aplicação, espectro de controle e culturas nas quais podem ser utilizados.

9.3.2 Comportamento no ambiente

Demonstram grande variabilidade em termos de persistência, sendo alguns bastante persistentes e outros rapidamente degradados. Em geral, as sulfoniluréias degradam-se no solo tanto por hidrólise química como por degradação microbiana. Os herbicidas do grupo das sulfoniluréias são ácidos fracos com pK' s variando de 3 a 5 e a forma neutra é especialmente susceptível à hidrólise. Portanto, a hidrólise ocorre muito mais rápido em solos ácidos (Thill, 1994). Em solos de pH alto, a hidrólise química é drasticamente reduzida e a degradação ocorre basicamente por ação microbiana (Joshi et al., 1985).

As sulfoniluréias podem ser móveis no solo, dependendo da sua estrutura química específica. Estes herbicidas apresentam maior potencial de lixiviação em solos de pH mais alto (Frederickson & Shea, 1986). As sulfoniluréias têm baixa pressão de vapor (10^{-12} a 10^{-6} mm Hg a 25 °C), tendo, portanto, pouca possibilidade de perdas por volatilização.

9.3.3 Susceptibilidade de culturas em rotação a resíduos de sulfoniluréias (*carryover*)

Uma grande variedade de culturas é sensível às doses recomendadas das sulfoniluréias. Quando estas culturas são plantadas em rotação com herbicidas deste grupo, existe a possibilidade de ocorrência de danos, dependendo da quantidade de herbicida persistente na estação seguinte, o que, por sua vez, é influenciada pelo pH do solo, umidade e temperatura. A mesma cultura pode responder de maneira diferente a um mesmo nível de resíduos de sulfoniluréias dependendo de fatores ambientais e do solo. Isto torna difícil prever a possibilidade de *carryover*. A presença de plantas daninhas sensíveis na área tratada já provou não ser um bom indicativo de quando as culturas podem ser plantadas com segurança.

No entanto, por serem moléculas ativas em concentrações muito baixas, injúrias por *carryover* para culturas em rotação são de grande importância com algumas sulfoniluréias. Chlorsulfuron, metsulfuron, triasulfuron, sulfometuron, chlorimuron, thifensulfuron, nicosulfuron, primasulfuron e ethametsulfuron tem restrições para culturas rotacionais que excedem 120 dias. Bensulfuron e tribenuron tem restrições para culturas rotacionais entre 60 e 120 dias (Thill, 1994). Após chlorimuron, culturas sensíveis incluem algodão e arroz, embora sorgo e milho apresentem boa tolerância para cultivo em sucessão à soja (Dan et al., 2010). Entre as culturas menos sensíveis incluem-se a soja, o trigo e o amendoim.

9.3.4 Modo de ação

O mecanismo de ação é a inibição da ALS, a enzima chave na rota de biossíntese de aminoácidos valina, leucina e isoleucina (Figura 6). Após a absorção, estes herbicidas são rapidamente translocados para áreas de crescimento ativo (meristemas, ápices), onde o crescimento é inibido em plantas suscetíveis. As plantas acabam morrendo devido à incapacidade de produzir os aminoácidos essenciais de que necessita. Excelentes revisões sobre o mecanismo de ação dos inibidores da ALS são feitas nos trabalhos publicados por Schloss (1990) e Durner et al. (1991).

9.3.5 Seletividade

Para as sulfoniluréias, o mecanismo isolado de maior importância em termos de seletividade é a conversão rápida a compostos inativos nas culturas tolerantes, ao passo que pouco ou nenhum metabolismo pode ser medido em plantas sensíveis. A aveia, o trigo e a cevada, por exemplo, podem acrescentar um grupamento -OH ao anel fenil do chlorsulfuron, após o que o herbicida conjuga-se com carboidratos formando um composto inativo (Beyer Jr. et al., 1988).

9.4 Triazolopirimidas

9.4.1 Características gerais

Esta família de herbicidas foi originalmente descoberta pela Dow-Elanco. No Brasil, todos os herbicidas deste grupo estão sendo utilizados para o controle de folhas largas na cultura da soja. O flumetsulam é usado em PPI ou pré-emergência e o cloransulam em pós-emergência, sendo que, mesmo aplicado em pós-emergência pode apresentar algum efeito residual. O diclosulam é recomendado para aplicação em PPI ou em pré-emergência, sendo que neste caso as aplicações devem ser feitas imediatamente após a semeadura da soja, não devendo ser ultrapassado o ponto de rachadura do solo (*cracking*), que ocorre com o início do processo de emergência da soja

9.4.2 Comportamento no ambiente

Maior sorção ocorre em solos ácidos e tende a aumentar com o período de contato do herbicida com o solo. A degradação destes herbicidas é predominantemente microbiana, tanto em sistemas aeróbicos quanto anaeróbicos.

Com relação à persistência, em áreas de soja tratadas com flumetsulam não se recomenda cultivos sequenciais de algodão, beterraba, canola e tomate (Rodrigues & Almeida, 2005). Fora do Brasil, existem recomendações para que culturas como milho, sorgo e algodão só sejam plantadas em áreas tratadas com cloransulam nove meses após a aplicação (Hatzios, 1998). Resultados de pesquisa indicam que o girassol é muito sensível à atividade residual do diclosulam, tornando esta cultura não adequada para

o plantio em áreas nas quais se utilizou o herbicida no cultivo anterior (Brighenti et al., 2002).

9.4.3 Modo de ação

Atuam nas plantas de forma semelhante às sulfoniluréias e imidazolinonas. Após aplicações destes herbicidas ao solo, a maioria das espécies sensíveis morre antes da emergência. Neste caso a absorção ocorre principalmente pelas raízes e, em menor intensidade, pelas partes aéreas antes da emergência. Normalmente translocam-se rapidamente, tanto pelo apoplasto quanto pelo simplasto.

9.4.4 Seletividade

A sensibilidade relativa de plantas às triazolopirimidas é função do tempo necessário para absorção e translocação e da taxa de metabolismo dentro da planta. No caso da soja, a tolerância é significativamente maior em pré que em pós-emergência.

9.5 Grupos químicos e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas		
	Nomes comuns	Nomes comerciais	
Imidazolinonas	Imazamox	Raptor, Sweeper	
	Imazapic	Plateau	
	Imazapyr	Chopper Florestal, Contain	
	Imazaquin	Imazaquin Ultra Nortox, Scepter, Soyaquin, Topgan	
	Imazethapyr	Differ, Dinamaz, Imazet, Imazetapir Plus Nortox, Imazetapir Prentiss, Pistol, Pivot, Vezir, Wide, Zaphir, Zethapyr	
Sulfoniluréias	Azimsulfuron	Gulliver	
	Chlorimuron-ethyl	Caput, Chlorimuron Agripec, Classic, Clorim, Chlorimuron Master Nortox, Chlorimuron Prentiss, Chlorimuron 250 BR, Conquest, Garbor, Panzer, Smart, Staron, Stilo, Twister	
		Cyclosulfamuron	Invest
		Ethoxysulfuron	Gladium
		Flazasulfuron	Katana
		Halosulfuron-methyl	Sempre
	Iodosulfuron-methyl	Hussar	
	Metsulfuron-methyl	Accurate, Ally, Nufuron, Wolf, Zartan Accent, Loop,	
	Nicosulfuron	Nicosulfuron Nortox, Nippon, Nisshin, Pramilho, Sanson	
	Oxasulfuron	Chart	
	Pyrazosulfuron-ethyl	Sirius	
	Trifloxysulfuron-sodium	Envoke	
	Triazolopirimidinas	Cloransulam-methyl	Pacto
Diclosulam		Coact, Spider	
Flumetsulam		Prevail, Scorpion	
Penoxsulam		Ricer	
Pirimidinil(tio)benzoatos	Bispyribac-sodium	Nominee, Sonora	
	Pyrithiobac-sodium	Staple	

Principais misturas: imidazolinonas

- Bentazon+imazamox: Amplo
- Glyphosate +imazaquin: Oneshot
- Glyphosate+imazethapyr: Alteza
- Imazapic+imazapyr: Kifix, Onduty
- Imazapic+imazethapyr: Only

Principais misturas: sulfoniluréias

- Ametryne+trifloxysulfuron-sodium: Krismat
- Atrazine+nicosulfuron: Sanson AZ
- Foramsulfuron+iodosulfuron-methyl: Equip Plus

Um grande número de outros inibidores da ALS não apresenta registro para uso no Brasil: imazamethabenz-methyl (imidazolinonas), amidosulfuron, bensulfuron-methyl, chlorsulfuron, cinosulfuron, ethametsulfuron-methyl, flucetosulfuron, flupyrsulfuron-methyl-sodium, imazosulfuron, mesosulfuron-methyl, orthosulfamuron, primisulfuron-methyl, prosulfuron, rimsulfuron, sulfometuron-methyl, sulfosulfuron, triasulfuron, tribenuron-methyl, thifensuron-methyl, triflusulfuron-methyl, tritosulfuron, propyrisulfuron (sulfoniluréias), floramsulam, metosulam, pyroxsulam (triazolopirimidinas), pyribenzoxim, pyriftalid, pyriminobac-methyl, pyrimisulfan (pirimidinil(tio)benzoatos), flucarbazone-sodium, thienicarbazone-methyl e propoxycarbazone-sodium (sulfonilaminocarboniltriazolinonas).

10. Inibidores da EPSP Sintase - Grupo G⁽⁹⁾

A descoberta do glyphosate ocorreu em 1950, sendo que este ácido apresentava considerável interesse como um agente complexante, redutor de pH, detergente, e muitas outras aplicações (Franz et al., 1997; Gruys & Sikorski, 1999). Nas décadas de 60 e 70 uma ampla rede de pesquisa foi desenvolvida para desenvolver as propriedades herbicidas do glyphosate. A primeira marca comercial começou a ser vendida nos anos 70, sendo que duas décadas após existiam cerca de 90 marcas formuladas à base deste ingrediente ativo (Gruys & Sikorski, 1999). Hoje, glyphosate é o herbicida mais utilizado e mais estudado no mundo, principalmente pelo seu amplo espectro de ação e pelo fato de apresentar eficácia no controle de invasoras de difícil manejo. Recentemente, o glyphosate foi objeto de ampla revisão e de detalhamento na obra publicada por Velini et al. (2009).

10.1 Características gerais

1. Atua apenas em pós-emergência. Sem atividade em pré-emergência devido à intensa sorção ao solo. Uma vez que é fortemente sorvido, torna-se não disponível para absorção pelas plantas;
2. Degradação microbiana é a rota principal de decomposição do glyphosate no solo, embora a oxidação e a fotodegradação também aconteçam;
3. Embora tenha pressão de vapor desprezível (pouco volátil), problemas de deriva podem acontecer com alguma frequência. O potencial de injúrias por deriva aumentou consideravelmente com a introdução das culturas tolerantes ao glyphosate e utilização mais intensiva deste herbicida;
4. É considerado não seletivo em função do amplo espectro, embora atualmente possa ser considerado seletivo para as culturas geneticamente modificadas.

10.2 Modo de ação

O glyphosate bloqueia a enzima EPSPs (5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato sintase), que catalisa a ligação dos compostos chiquimato 3-fosfato (S3P) e fosfoenolpiruvato (PEP), produzindo o enolpiruvilchiquimato-3-fosfato e fosfato inorgânico. A enzima reage inicialmente com o S3P e depois com o PEP. A inibição da EPSPs leva ao acúmulo de altos níveis de chiquimato nos vacúolos, o que é intensificado pela perda de controle do fluxo de carbono na rota (Fedtke & Duke, 2005). Ocorre, ainda, o bloqueio da síntese de três aminoácidos aromáticos: o triptofano, a fenilalanina e a tirosina (Figura 6) (Zablotowicz & Reddy, 2004).

Em plantas suscetíveis tratadas com glyphosate, a molécula do herbicida não se liga à enzima livre, mas ao complexo EPSPs-S3P, impedindo a ligação do PEP, formando o complexo inativo EPSPs-S3P-glyphosate (Monquero et al., 2004). A afinidade do glyphosate ao complexo EPSPs-S3P é 75 vezes maior do que com a PEP e sua dissociação do sítio de ação é 2000 vezes menor do que com a PEP (Ream et al., 1992). Nas plantas, a EPSPs é sintetizada no citoplasma, sendo transportada ao cloroplasto em forma de pré-enzima (pEPSPs). A ligação e inibição do glyphosate à enzima também acontece no citoplasma, formando o complexo glyphosate-pEPSPs-S3P (Kruse et al., 2000). Portanto, há redução na eficiência fotossintética e menor produção de aminoácidos aromáticos.

O glyphosate é absorvido pelas folhas e outras partes aéreas das plantas. Uma vez absorvido, transloca-se rápida e intensivamente pelo simplasto. Depois de atingir o floema, geralmente segue o fluxo de movimento de fotoassimilados fonte-dreno e se acumula em áreas de crescimento ativo (meristemas). Após, ocorre a paralisação do crescimento e muitos tecidos das plantas degradam-se lentamente em função da falta de proteínas.

Glyphosate tende a acumular-se em regiões meristemáticas das plantas tratadas, devido a sua rápida translocação das folhas para as raízes, rizomas e meristemas apicais através do floema, juntamente com os fotoassimilados. Em contraste com outros herbicidas, os sintomas de toxicidade ocorrem relativamente devagar. Os sintomas geralmente desenvolvem-se lentamente, com gradual aparecimento de clorose e necrose. A morte da planta susceptível pode ocorrer em alguns dias ou semanas (Franz et al., 1997; Monquero et al., 2004).

Embora o mecanismo de ação do glyphosate seja amplamente conhecido, alguns outros possíveis efeitos sobre as plantas são menos estudados. Estes efeitos secundários, no entanto, podem apresentar implicações importantes no crescimento de plantas e de microrganismos (Kremer et al., 2005; Kremer & Means, 2009; Zobiolo et al., 2010a,b,c).

10.3 Seletividade

Estes herbicidas são tradicionalmente utilizados como herbicidas não seletivos. Entre os usos mais importantes destacam-se o manejo de áreas para dessecação em semeadura direta e a limpeza de áreas não agrícolas. Em aplicações dirigidas podem ser usados em muitas culturas perenes, desde que não atinjam as folhas. Como não possuem efeito residual no solo, aplicações em pós-emergência das plantas daninhas realizadas antes da emergência das culturas também podem ser feitas.

Com o advento das plantas transgênicas, o glyphosate passou a ser uma opção para o controle seletivo de plantas daninhas na soja *Roundup Ready*. Posteriormente o cultivo de espécies geneticamente modificadas para tolerância ao glyphosate passou a incluir também o milho e o algodão no Brasil, e canola, mamão, alfafa e beterraba açucareira em outros países.

10.4 Grupo químico e herbicidas

Grupo químico	Nomes comuns	Herbicidas
		Nomes comerciais
Glicinas	Glyphosate	Fera, Direct, Gliato, Glifos, Glifos Plus, Glifosato Agripec 720, Glifosato Atanor, Glifosato Atar, Glifosato Cropchem, Glifosato Fersol, Glifosato Nortox, Glifosato Nufarm, Glifosato Nutritop, Glifosato Zamba, Glifosato 480 Agripec, Glifosato 480 Helm, Glifosato 480 Pikapau, Glifoxin, Glyphogan, Glistar, Gli-up, Gliz 480, Gliz Plus, Glizmax, Glyox, Glyphotal, Pilarsato, Polaris, Pretorian, Radar, Rodeo, Ronat Roundup Original, Roundup Ready, Roundup Ready Milho, Roundup Transorb, Roundup Ultra, Roundup WG, Rustler, Samurai, Scout, Shadow, Stinger, Sumô, Touchdown, Tradicional, Trop, Tupan, Zapp QI

Principais misturas:

- Atrazine+glyphosate: Gillanex
- Diuron+glyphosate: Glydur, Tropuron
- Glyphosate+imazaquin: Oneshot
- Glyphosate+imazetapyr: Alteza
- Glyphosate+simazine: Tropazin

No grupo químico das glicinas pode ser enquadrado também o sulfosate, atualmente sem registro para uso no Brasil.

11. Inibidores da Glutamina Sintetase (GS) – Grupo H⁽¹⁰⁾

11.1 Características gerais

Até alguns anos atrás, o amônio glufosinate, único herbicida importante com este mecanismo de ação, era considerado apenas como um herbicida de amplo espectro, não seletivo. Com o surgimento da tecnologia *Liberty Link*, passou também a ser usado para controle de plantas daninhas em algumas culturas. Trata-se de um gene de resistência ao amônio glufosinate que foi introduzido em algumas variedades de algodão, canola, beterraba açucareira, soja e milho, estando em desenvolvimento também para a cultura do arroz, visando dar tolerância a estes materiais a aplicações em pós-emergência do amônio glufosinate. O gene que confere resistência ao glufosinate foi isolado de duas espécies de bactéria do gênero *Streptomyces*. Esta tecnologia tem sido utilizada como uma alternativa em nas áreas onde biotipos de plantas daninhas resistentes ao glyphosate têm surgido.

Uma outra novidade recentemente introduzida no mercado diz respeito à tecnologia de proteção contra insetos (Herculex*TM; YieldgardTM), presente na própria planta, criada pela introdução do gene cry1F, proveniente de um microrganismo que ocorre naturalmente no solo, o *Bacillus thuringiensis* (Bt), o qual é responsável pela produção de uma proteína inseticida. Os híbridos de milho com esta característica apresentam também a tecnologia *Liberty Link*, que foi utilizada como marcador de seleção durante o processo de desenvolvimento do evento.

11.2 Modo de ação

Este herbicida inibe a atividade da glutamina sintetase (GS), enzima que converte o glutamato e amônia em glutamina. A GS é a enzima inicial na rota que converte N inorgânico em compostos orgânicos. É uma enzima-chave no metabolismo do nitrogênio uma vez que, além de assimilar amônia produzida pela nitrito redutase, ela recicla amônia produzida por outros processos, incluindo a fotorespiração e reações de deaminação (Figura 7).

A inibição da atividade da GS leva ao acúmulo rápido de altos níveis de amônia, o que, por sua vez, leva à destruição das células e inibe diretamente as reações dos fotossistemas I e II. Este acúmulo também reduz o gradiente de pH na membrana, o que pode desacoplar a fotofosforilação (Senseman, 2007).

O acúmulo de amônia causado pelo glufosinate é acompanhado pela paralisação da fotossíntese e disrupção da estrutura dos cloroplastos. Embora alguns pesquisadores tenham atribuído a inibição da fotossíntese em células tratadas com inibidores da GS aos efeitos da amônia sobre a fotossíntese, e sobre a fotofosforilação em particular, o que se acredita atualmente é que a depleção de glutamina causada pelo glufosinate é a causa primária da paralisação da fotossíntese. Outra possibilidade para explicar a paralisação da fotossíntese é o acúmulo de glioxilato, um inibidor da RuBP carboxilase (Devine et al., 1993).

11.3 Seletividade

O glufosinate é considerado um herbicida não seletivo. Embora exista considerável variação entre espécies em relação à sensibilidade a este herbicida, a variação não ocorre em função de diferenças na GS (Ridley & McNally, 1985). Plantas transgênicas resistentes ao glufosinate têm sido produzidas por meio da tecnologia *Liberty Link*.

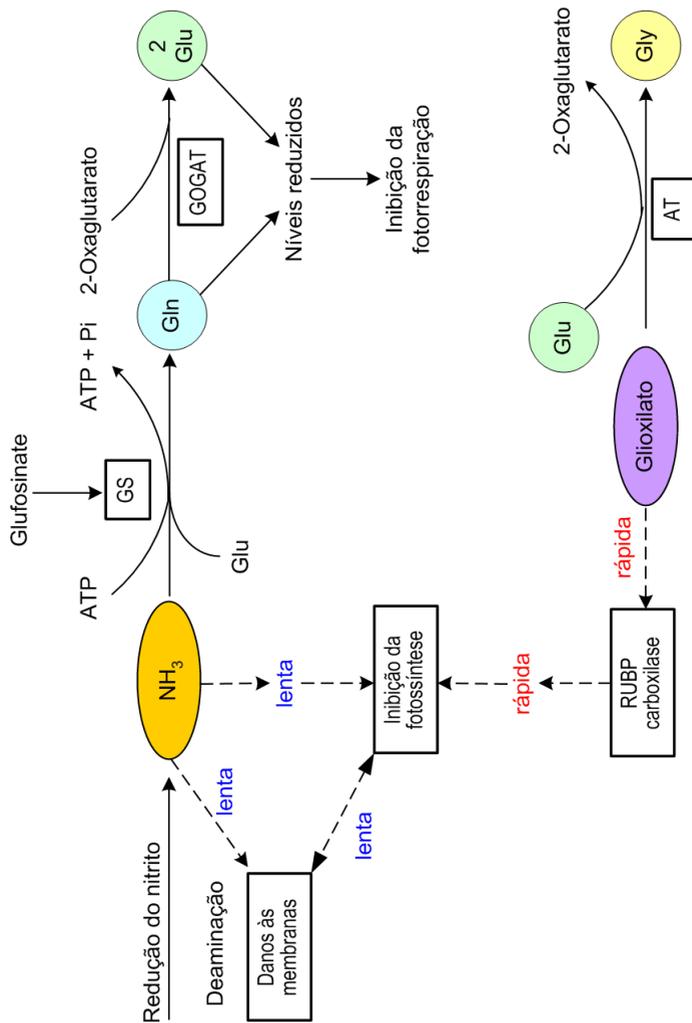


Figura 7. Efeitos da inibição da glutamina sintetase (GS) na fisiologia de uma célula vegetal. Setas pontilhadas representam inibição (lenta ou rápida), elipses indicam níveis aumentados e círculos indicam níveis diminuídos. GOGAT = glutamato sintetase, AT = aminotransferase. Adaptado de Devine et al. (1993).

11.4 Grupo químico e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Ác. fosfínico	amonio glufosinate	Finale, Liberty

Outro herbicida com este mesmo mecanismo de ação é o bialaphos (ácido fosfínico).

12. Inibidores da Síntese de Lipídeos (Não ACCase) - Grupo N^(8,16,26)

O principal grupo químico é o dos tiocarbamatos. Embora atualmente exista apenas um princípio ativo registrado para uso deste grupo, diversos princípios importantes do controle químico de plantas daninhas foram desenvolvidos primeiramente com o grupo dos tiocarbamatos. A incorporação ao solo, por exemplo, foi desenvolvida principalmente para contornar a falta de eficiência de aplicações superficiais de EPTC (atualmente não registrado para uso no Brasil), sendo este também o primeiro herbicida efetivamente aplicado via água de irrigação. Neste grupo também estão os primeiros herbicidas nos quais foram utilizados protetores na formulação para conferir seletividade para o milho.

12.1 Características gerais

1. Todos são aplicados ao solo e apresentam alta pressão de vapor, havendo necessidade de incorporação. Por apresentarem boa solubilidade, podem ser incorporados por meio de irrigações pesadas;
2. Inibem o crescimento da parte aérea mas não têm efeito direto sobre as raízes;
3. Penetram rapidamente nas raízes, mas devem ser translocados até os meristemas apicais para serem ativos;
4. Movem-se prontamente pelo xilema;
5. São rapidamente metabolizados a CO₂ ou outros constituintes naturais das plantas;
6. A persistência no solo é relativamente curta. A maior parte da dissipação ocorre por volatilização e decomposição microbiana;
7. A maioria é mais ativa sobre gramíneas anuais, mas controlam muitas outras plantas daninhas e alguns são usados para suprimir o crescimento inicial de tiririca.

12.2 Modo de ação

Não é exatamente conhecido, mas o sítio de atuação em gramíneas durante sua emergência são folhas em desenvolvimento e o ponto de crescimento da parte aérea. Têm sido demonstrados efeitos na mitose, mas apenas em doses bem mais altas do que aquelas que paralisam o crescimento (o efeito é, portanto, secundário).

Sabe-se que os tiocarbamatos inibem a biossíntese de ácidos graxos, lipídeos (o que pode explicar a redução da deposição da camada de cera cuticular), proteínas, isoprenóides (inclusive giberilinas), e flavonóides (inclusive antocianinas). Especula-se que a ligação entre todos estes fatos possa envolver a conjugação da acetil-coenzima A e outras moléculas contendo radicais sulfidríla aos sulfóxidos do molinate e thiobencarb, o que pressupõe que estas sejam as formas verdadeiramente ativas destes herbicidas (Senseman, 2007).

Sintomas decorrentes da aplicação destes herbicidas incluem a distorção da primeira folha e retenção (restrição da emergência a partir do coleóptilo). Em condições de campo, gramíneas susceptíveis geralmente conseguem emergir mas permanecem muito pequenas e com as folhas severamente distorcidas; eventualmente morrem. No caso da tiririca, não ocorre morte dos tubérculos, mas o crescimento dos mesmos é atrasado até o EPTC dissipar-se no solo.

12.3 Seletividade

- Em geral as dicotiledôneas são mais tolerantes do que gramíneas, embora existam grandes diferenças entre espécies dentro de cada classe;
- Localização das sementes e do herbicida (seletividade de posição);
- Por meio do uso de substâncias protetoras (Ex: EPTC + protetor específico para milho resulta em maior inativação do produto por meio de reações de conjugação).

12.4 Grupo químico e herbicidas

Grupo químico	Herbicidas	
	Nomes comuns	Nomes comerciais
Tiocarbamatos	Thiobencarb	Saturn

Principais misturas:

- Propanil+thiobencarb: Grassmax, Satanyl

Dentro do grupo dos tiocarbamatos, além de thiobencarb, encontram-se butylate, cycloate, EPTC, esprocarb, molinate, orbencarb, pebulate,

prosulfoarb, tiocarbazil, triallate e vernolate. Outros grupos químicos (fosforoditioatos, benzofuranas e ácido clorocarbônico) apresentam limitado número de moléculas.

13. Outros Mecanismos de Ação

Inibidores da DHP (dihidropteroato) sintase - Grupo I⁽¹⁸⁾

Grupo químico e herbicida: carbamatos (asulam).

Inibidores da síntese de (celulose) parede celular – Grupo L^(20,21,26,27)

Grupos químicos e respectivos herbicidas: nitrilas (dichlobenil, chlor-tiamid), benzamidas (isoxaben), triazolocarboxamidas (flupoxam) e ácido quinolinocarboxílico (quinclorac – apenas no caso de monocotiledôneas – também grupo O).

Desacopladores (disruptores de membrana) - Grupo M⁽²⁴⁾

Grupo químico e respectivos herbicidas: dinitrofenóis (DNOC, dinoseb, dinoterb).

Inibidores do transporte de auxinas – Grupo P⁽¹⁹⁾

Grupos químicos e respectivos herbicidas: ftalamatos (naptalam) e semicarbazonas (diflufenzopyr-Na).

Mecanismo de ação desconhecido – Grupo Z^(25,26,17)

Uma vez que os sítios de atuação destes herbicidas não é conhecido, é possível que eles apresentem diferenças no mecanismo de ação entre eles e em relação aos demais grupos. Os grupos químicos que se enquadram neste grupo são listados na Tabela 1. O único herbicida registrado para uso no Brasil classificado neste mecanismo de ação é o MSMA.

- **MSMA** (Ancosar, Ansar, Daconate, Dessecan, MSMA 720, MSMA 720 Dow AgroSciences, MSMA 720 Volagro, Volcane): Pertence ao grupo químico dos organoarsenicais ou arsenicais orgânicos. Registrado no Brasil para algodão, café, cana, citros e áreas não cultivadas, com largo espectro de ação sobre gramíneas e espécies de folhas largas anuais. Usado em pós-emergência, uma vez que a absorção é essencialmente foliar. É aplicado em jato dirigido se as culturas não lhe são tolerantes, sendo esta modalidade a mais utilizada no Brasil, principalmente na cultura do algodão. A absorção é essencialmente foliar, sendo considerado um produto tipicamente de contato. Em áreas não cultivadas pode ser usado como dessecante, sendo comum a mistura com herbicidas hormonais.

O desacoplamento energético (ATP) tem sido proposto como sendo o ponto de atuação do MSMA nas plantas, mas as evidências disponíveis são insuficientes para indicar o mecanismo exato. A dessecação rápida causada pela aplicação deste herbicida indica a destruição de membranas celulares.

Referências

- Balke, N.E., Herbicide effects on membrane functions. In: Duke, S.O. (Ed.), *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. II, p. 113–139, 1985.
- Bartels, P.G., Effects of herbicides on chloroplast and cellular development. In: Duke, S.O. (Ed.), *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. II, p. 64–91, 1985a.
- Bartels, P.G., Effects of herbicides on photosynthesis. In: Duke, S.O. (Ed.), *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. II, p. 2–36, 1985b.
- Beyer Jr., E.; Duffy, M.; Hay, J. & Schlueter, D., Sulfonylureas. In: Kearney, P.C. & Kaufman, D.D. (Eds.), *Herbicides chemistry, degradation and mode of action*. New York, EUA: Marcel Dekker, p. 117–189, 1988.
- Brighenti, A.M.; Moraes, V.J.; Oliveira Jr., R.S.; Gazziero, D.L.P. & Gomes, J.A., Persistência e fitotoxicidade de herbicidas aplicados na soja sobre o girassol em sucessão. *Pesq Agropec Bras*, 37:559–565, 2002.
- Che, M.; Loux, M.M.; Traina, S.J. & Logan, T.J., Effect of pH on sorption and desorption of imazaquin and imazethapyr on clays and humic acid. *J Environ Qual*, 21:698–703, 1992.
- Croteau, R., Clomazone does not inhibit the conversion of isopentenyl pyrophosphate to geranyl, farnesyl, or geranylgeranyl pyrophosphate in vitro. *Plant Physiol*, 98:1515–1517, 1992.
- Dan, H.A.; Dan, L.G.M.; Barroso, A.L.L.; Procópio, S.O.; Oliveira Jr., R.S.; Silva, A.G.; Lima, M.D.B. & Feldkircher, C., Residual activity of herbicides used in soybean agriculture on grain sorghum crop succession. *Planta Daninha*, 28:1087–1095, 2010.
- Dan Hess, F., Mode of action of paraquat and diquat. In: Purdue University, (Ed.), *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: CRC Press, p. 118–127, 1994a.
- Dan Hess, F., Mode of action of photosynthesis inhibitors. In: Purdue University, (Ed.), *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: CRC Press, p. 85–102, 1994b.
- Dan Hess, F., Mode of action of lipid biosynthesis inhibitors (graminicides – ACCase inhibitors). In: Purdue University, (Ed.), *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: CRC Press, p. 201–216, 1994c.

- Devine, M.; Duke, S.O. & Fedtke, C., *Physiology of herbicide action*. Englewood Cliffs, EUA: Prentice Hall, 1993. 441 p.
- Duke, S.O. & Kenyon, W.H., Effects of dimethazone (FMC 57020) on chloroplast development. II. Pigment synthesis and photosynthetic function in cowpea (*Vigna unguiculata* L.) primary leaves. *Pestic Biochem Physiol*, 25:11–18, 1986.
- Durner, J.; Gailus, V. & Böger, P., New aspects on inhibition of plant acetolactate synthase depend on flavin adenine dinucleotide. *Plant Physiol*, 95:1144–1149, 1991.
- Fedtke, C. & Duke, S.O., Herbicides. In: Hock, B. & Elstner, E.F. (Eds.), *Plant toxicology*. New York, EUA: Marcel Dekker, p. 247–330, 2005.
- Ferhatoglu, Y.; Avdiushko, S. & Barret, M., The basic for safening of clomazone by phorate insecticide in cotton and inhibitors of cytochrome P450s. *Pest Biochem Physiol*, 81:59–70, 2005.
- Ferhatoglu, Y. & Barret, M., Studies of clomazone mode of action. *Pestic Biochem Physiol*, 85:7–14, 2006.
- Franz, J.E.; Mao, M.K. & Sikorski, J.A., *Glyphosate: A unique global herbicide*. Washington, EUA: American Chemical Society, 1997. 678 p.
- Frederickson, D.R. & Shea, P.J., Effect of soil pH on degradation, movement, and plant uptake of chlorsulfuron. *Weed Sci*, 34:328–332, 1986.
- Goetz, A.J.; Lavy, T.L. & Gbur, E.E., Degradation and field persistence of imazethapyr. *Weed Sci*, 38:421–428, 1990.
- Gressel, J., Herbicide tolerance and resistance alteration of site of activity. In: Duke, S. (Ed.), *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. II, p. 160–190, 1985.
- Grossman, K. & Kwiatkowski, J., Selective induction of ethylene and cyanide biosynthesis appears to be involved in the selectivity of the herbicide quinclorac between rice and barnyardgrass. *J Plant Physiol*, 142:457–466, 1993.
- Gruys, K.J. & Sikorski, J.A., Inhibitors of tryptophan, phenylalanine and tyrosine biosynthesis as herbicides. In: Singh, B.K. (Ed.), *Plant amino acids: biochemistry and biotechnology*. New York, EUA: Marcel Dekker, p. 357–384, 1999.
- Halliwell, B., Oxygen radicals: their formation in plant tissues and their role in herbicide damage. In: Baker, N.R. & Percival, M.P. (Eds.), *Herbicides*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science Ltd, v. 10 de *Topics in photosynthesis*, p. 87–129, 1991.
- Hartzler, R.G.; Fawcett, R.S. & Taber, H.G., Effects of trifluralin on corn (*Zea mays*) growth and nutrient content. *Weed Sci*, 38:468–470, 1990.

- Hatzios, K.K. (Ed.), *Herbicide Handbook. Supplement to seventh edition*. Lawrence, EUA: Weed Science Society of America, 1998. 103 p.
- Hess, D. & Bayer, D., The effect of trifluralin on the ultrastructure of dividing cells of the root meristem of cotton (*Gossypium hirsutum*). *J Cell Sci*, 15:429-441, 1974.
- Hess, D. & Bayer, D.E., Binding of the herbicide trifluralin to *Chlamydomonas flagellar* tubulin. *J Cell Sci*, 24:351-360, 1977.
- Jaremtchuk, C.C.; Constantin, J.; Oliveira Jr., R.S.; Biffe, D.F.; Alonso, D.G. & Arantes, J.G., Efeito de sistemas de manejo sobre a velocidade de dessecação, infestação inicial de plantas daninhas e desenvolvimento e produtividade da soja. *Acta Sci Agron*, 30:449-455, 2008.
- Joshi, M.M.; Brown, H.M. & Romesser, J.A., Degradation of chlorsulfuron by soil microorganisms. *Weed Sci*, 33:888-893, 1985.
- Kowalczyk-Schröder, S. & Sandmann, G., Interference of fluridone with desaturation of phytoene by membranes of the cyanobacterium *Aphanocapsa*. *Pest Biochem Physiol*, 42:7-12, 1992.
- Kremer, R.; Means, N. & Kim, K., Glyphosate affects soybean root exudation and rhizosphere microorganisms. *Int J Environ Anal Chem*, 85:1165-1174, 2005.
- Kremer, R.J. & Means, N.E., Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *Eur J Agron*, 31:153-161, 2009.
- Kruse, N.D.; Trezzi, M.M. & Vidal, R.R., Herbicidas inibidores da EPSPS: revisão de literatura. *Rev Bras Herb*, 1:139-146, 2000.
- Lignowski, E.M. & Scott, E.G., Effect of trifluralin on mitosis. *Weed Sci*, 20:267-270, 1972.
- Loux, M.M.; Liebl, R.A. & Slife, F.W., Adsorption of imazaquin and imazethapyr on soils, sediments and selected sorbents. *Weed Sci*, 37:712-718, 1989.
- Loux, M.M. & Reese, K.D., Effect of soil pH on adsorption and persistence of imazaquin. *Weed Sci*, 40:490-496, 1992.
- Mangels, G., Behavior of the imidazolinone herbicides in soil - a review of the literature. In: Shaner, D.L. & O'Connor, S.L. (Eds.), *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton, EUA: CRC Press, p. 191-209, 1991.
- Monks, C.D. & Banks, P.A., Rotational crop response to chlorimuron, clo-mazone, and imazaquin applied the previous year. *Weed Sci*, 39:629-633, 1991.
- Monquero, P.A.; Christoffoleti, P.J. & Osuna, M.D., Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. *Planta Daninha*, 22:445-451, 2004.

- Moyer, J.R. & Esau, R., Imidazolinone herbicide effects on following rotational crops in Southern Alberta. *Weed Technol*, 10:100-106, 1996.
- O'Bryan, K.A.; Brecke, B.J.; Schilling, D.G. & Colvin, D.L., Comparison of bioassay techniques for detecting imazaquin in soil. *Weed Technol*, 8:203-206, 1994.
- Oliveira, V.R.; Scapim, C.A.; Oliveira Jr., R.S. & Pires, N.M., Efeito do herbicida trifluralin sobre a germinação de sementes e o índice mitótico de raízes de milho. *Revista UNIMAR*, 18:537-544, 1996.
- Oliveira Jr., R.S., Atividade residual no solo de imazaquin e alachlor+atrazine visando plantio sequencial de canola. *Ciência Rural*, 31:217-222, 2001.
- Parka, S.J. & Soper, O.F., The physiology and mode of action of the dinitroaniline herbicides. *Weed Sci*, 25:79-87, 1977.
- Ream, J.E.; Yuen, H.K.; Frazier, R.B. & Sikorski, J.A., EPSP synthase: binding studies using isothermal titration microcalorimetry and equilibrium dialysis and their implication for ligand recognition and kinetic mechanism. *Biochemistry*, 31:5528-5534, 1992.
- Renner, K.A.; Meggit, W.F. & Penner, D., Effect of soil pH on imazaquin and imazethapyr adsorption to soil and phytotoxicity to corn (*Zea mays*). *Weed Sci*, 36:78-83, 1988.
- Retzinger Jr., E.J. & Mallory-Smith, C., Classification of herbicides by site of action for weed resistance management strategies. *Weed Technol*, 11:384-393, 1997.
- Ridley, S.M. & McNally, S.F., Effects of phosphinothricin on the isozymes of glutamine synthetase isolated from plant species which exhibit varying degrees of susceptibility to the herbicide. *Plant Sci*, 39:31-36, 1985.
- Rodrigues, B.N. & Almeida, F.S., *Guia de herbicidas*. 5a edição. Londrina, PR: Ed. dos autores, 2005. 591 p.
- Sandmann, G. & Böger, P., Inhibition of carotenoid biosynthesis by herbicides. In: Böger, P. & Sandmann, G. (Eds.), *Target sites of herbicide action*. Boca Raton, EUA: CRC Press, p. 25-44, 1989.
- Schloss, J.V., Acetolactate synthase, mechanism of action and its herbicide binding site. *Pestic Sci*, 29:283-292, 1990.
- Senseman, S.A. (Ed.), *Herbicide Handbook*. 9a edição. Lawrence, EUA: Weed Science Society of America, 2007. 458 p.
- Silva, A.A.; Oliveira Jr., R.S.; Costa, E.R. & Ferreira, L.R., Efeito residual no solo dos herbicidas imazamox e imazethapyr para as culturas de milho e sorgo. *Planta Daninha*, 17:345-354, 1999.
- Stidham, M.A., Herbicides that inhibit acetohydroxyacid synthase. *Weed Sci*, 39:428, 1991.

- Thill, D.C., Sulfonylureas and triazolopyrimidines. In: Purdue University, (Ed.), *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: Purdue University, p. 317–343, 1994.
- University of Minnesota, , *Cultural and chemical weed control in field crops*. St. Paul, EUA: University of Minnesota, Extension service, 2009. 85 p.
- Vargas, L.; Silva, A.A.; Borém, A.; Rezende, S.T.; Ferreira, F.A. & Sedyama, T., *Resistência de plantas daninhas a herbicidas*. Viçosa, MG: Ed. dos autores, 1999. 131 p.
- Velini, E.D.; Meschede, D.K.; Carbonari, C.A. & Trindade, M.L.B., *Glyphosate*. Botucatu, SP: FEPAF, 2009. 493 p.
- Vidal, R.A., *Herbicidas: mecanismos de ação e resistência de plantas*. Porto Alegre, RS: Ed. do autor, 1997. 165 p.
- Weimer, M.R.; Balke, N.E. & Buhler, D.D., Herbicide clomazone does not inhibit *in vitro* geranylgeranyl synthesis from mevalonate. *Plant Physiol*, 98:427–432, 1992.
- Weimer, R., Clomazone does not inhibit the conversion of isopentenyl pyrophosphate to geranyl, farnesyl, or geranylgeranyl pyrophosphate in vitro. *Plant Physiol*, 98:1515–1517, 1992.
- Yun, M.S.; Yogo, Y.; Miura, R.; Yamasue, Y. & Fischer, A.J., Cytochrome P-450 monooxygenase activity in herbicide-resistant and -susceptible late watergrass (*Echinochloa phyllopogon*). *Pestic Biochem Physiol*, 83:107–114, 2005.
- Zablotowicz, R.M. & Reddy, K.N., Impact of glyphosate on the *Bradyrhizobium japonicum* symbiosis with glyphosate-resistant transgenic soybean: a minireview. *J Environ Qual*, 33:825–831, 2004.
- Zimdhal, R.L., *Fundamentals of weed science*. San Diego, EUA: Academic Press, 1993. 450 p.
- Zobiolo, L.H.S.; Kremer, R.J.; Oliveira Jr., R.S. & Constantin, J., Glyphosate affects photosynthesis in first and second generation of glyphosate-resistant soybeans. *Plant and Soil*, 336:251–265, 2010a.
- Zobiolo, L.H.S.; Oliveira Jr., R.S.; Huber, D.M.; Constantin, J.; Castro, C.; Oliveira, F.A. & Oliveira Junior, A., Glyphosate reduces shoot concentrations of mineral nutrients in glyphosate-resistant soybeans. *Plant and Soil*, 328:57–69, 2010c.
- Zobiolo, L.H.S.; Oliveira Jr., R.S.; Kremer, R.J.; Constantin, J.; Bonato, C.M. & Muniz, A.S., Water use efficiency and photosynthesis of glyphosate-resistant soybean as affected by glyphosate. *Pestic Biochem Physiol*, 97:182–193, 2010b.

Resistência de Plantas Daninhas a Herbicidas

Miriam Hiroko Inoue e Rubem Silvério de Oliveira Jr.

1. Introdução

Em consequência da consolidação das áreas de plantio direto, da agregação de novas áreas produtivas, da crescente dificuldade em conseguir mão-de-obra no campo, aliadas à grande disponibilidade e eficiência de produtos químicos, o consumo de herbicidas tem crescido rapidamente nas últimas décadas. Portanto, mesmo dentro de programas de manejo integrado de plantas daninhas, os herbicidas ainda representam a principal ferramenta de controle.

Com a intensa utilização de herbicidas, um outro ponto que tem crescido em importância é a resistência de plantas daninhas a estes produtos. O uso recorrente de determinados herbicidas ou mecanismos de ação na mesma área tem levado à seleção de populações resistentes a certos grupos químicos e consequentes falhas no controle. Dentro deste contexto, é fundamental definir os principais termos relacionados à discussão do assunto.

Por **susceptível** compreende-se aquela planta ou população que, uma vez submetida a certa dose do herbicida, tem seu crescimento ou desenvolvimento suficientemente reduzido para ser considerada como controlada por aquele tratamento herbicida. Por outro lado, define-se como **tolerante** o indivíduo ou população que possui a capacidade inata de sobreviver e se reproduzir após o tratamento herbicida, mesmo quando eventualmente sofre algum nível de injúria. **Biótipos** são indivíduos com carga genética semelhante, pouco diferenciados da maioria dos indivíduos da população.

Resistência é a ocorrência natural da habilidade hereditária de alguns biótipos de plantas daninhas dentro de uma população, os quais são capazes de sobreviver a um tratamento herbicida que, sob condições normais de uso, controlaria de forma efetiva esta população de plantas daninhas. Adicionalmente, o termo **resistência cruzada** define um biótipo de planta daninha cuja resistência se manifesta em relação a dois ou mais herbicidas que possuem um único mecanismo de ação. Por fim, **resistência múltipla** refere-se a situações onde a resistência das plantas acontece em relação a dois ou mais mecanismos de ação distintos.

Várias informações relacionadas ao desenvolvimento de resistência contidas neste capítulo foram extraídas da *homepage* da Weed Science Society

of America (Heap, 2011). Neste site é possível ter uma idéia atualizada da situação dos casos de resistência no Brasil e no mundo.

2. Histórico e Situação Atual da Resistência

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é resultante do processo evolucionário, que ocorre espontaneamente em suas populações, não sendo, portanto, o herbicida o agente causador, mas sim selecionador de indivíduos resistentes que se encontram em baixa frequência inicial (Christoffoleti et al., 1994). Assim, a variabilidade genética natural existente em qualquer população de plantas daninhas é a responsável pela fonte inicial de resistência em uma população suscetível. Segundo Kissmann (1996), todas as populações de plantas daninhas, independentemente da aplicação de qualquer produto, provavelmente contêm biótipos que são resistentes a herbicidas.

Historicamente, o primeiro caso de resistência foi relatado em 1957, com plantas de *Commelina diffusa* resistentes a herbicidas mimetizadores da auxina (Kissmann, 1996). Existem atualmente acima 352 biótipos de plantas daninhas resistentes em 400 mil locais do mundo, distribuídos entre 196 espécies (114 dicotiledôneas e 82 monocotiledôneas). No mundo, o número de espécies de plantas daninhas resistentes aos herbicidas inibidores da acetolactado sintase (ALS) é de 107, o de espécies resistentes aos herbicidas inibidores da acetil coenzima-A carboxilase (ACCase) é de 39 e o de espécies resistentes aos herbicidas inibidores da enol-piruvil-shiquimato-fosfato sintase (EPSPs) é de 21. O restante dos biótipos de plantas daninhas resistentes encontra-se distribuído em diversas classes químicas (Heap, 2011).

No Brasil, o primeiro caso confirmado de resistência foi de *Euphorbia heterophylla*, em regiões produtoras de soja no ano de 1992 (Gazziero et al., 1998; Vidal & Merotto Jr., 1999). Posteriormente, outros trabalhos evidenciaram a disseminação dos casos de resistência em espécies como *Bidens pilosa*, *Bidens subalternans*, *Brachiaria plantaginea*, *Cyperus difformis*, *Fimbristylis miliacea*, *Lolium multiflorum*, *Digitaria ciliaris*, *Eleusine indica*, *Parthenium hysterophorus*, *Echinochloa crusgalli*, *Echinochloa crus-pavonis*, *Raphanus sativus*, *Sagittaria montevidensis*, *Conyza bonariensis*, *Conyza canadensis*, *Oryza sativa* e *Digitaria insularis* (Christoffoleti et al., 1996; Gazziero et al., 2000; Monquero et al., 2000; Noldin et al., 2000, 2002a,b; Theisen, 2004; Roman et al., 2004; Vargas et al., 2004; López-Ovejero et al., 2005; Gazziero et al., 2006; Vidal et al., 2006; Andres et al., 2007; Concenço et al., 2007; Moreira et al., 2007; Menezes et al., 2009; Heap, 2011). A Tabela 1 apresenta o ano de surgimento dos biótipos resistentes, bem como os mecanismos de ação ou grupos químicos para os quais foram constatados os casos de resistência.

Dentro deste contexto, o principal desafio tem sido o limitado número de mecanismos de ação alternativos para serem usados no controle de bió-

Tabela 1. Evolução dos casos comprovados de resistência de plantas daninhas a herbicidas no Brasil. Fonte: Adaptado de Heap (2011).

Ano	Espécie	Mecanismo de ação ou grupo químico
1992	<i>Euphorbia heterophylla</i> (leiteiro)	Inibidores da ALS
1993	<i>Bidens pilosa</i> (picão-preto)	Inibidores da ALS
1996	<i>Bidens subalternans</i> (picão-preto)	Inibidores da ALS
1997	<i>Brachiaria plantaginea</i> (capim-marmelada)	Inibidores da ACCase
1999	<i>Echinochloa crusgalli</i> (capim-arroz)	Auxinas sintéticas
1999	<i>Echinochloa crus-galli</i> (capim-arroz)	Auxinas sintéticas
1999	<i>Sagittaria montevidensis</i> (sagitária)	Inibidores da ALS
2000	<i>Cyperus difformis</i> (junquinho, tiririca-do-brejo)	Inibidores da ALS
2001	<i>Fimbristylis miliacea</i> (cominho)	Inibidores da ALS
2001	<i>Raphanus sativus</i> (nabo)	Inibidores da ALS
2002	<i>Digitaria ciliaris</i> (capim-colchão)	Inibidores da ACCase
2003	<i>Eleusine indica</i> (capim-pé-de-galinha)	Inibidores da ACCase
2003	<i>Lolium multiflorum</i> (azevém)	Derivados da glicina
2004	<i>Parthenium hysterophorus</i> (losna-branca)	Inibidores da ALS
2004	<i>Euphorbia heterophylla</i> (leiteiro)	Inibidores da ALS
	(Resistência múltipla)	Inibidores da PROTOX
2005	<i>Conyza bonariensis</i> (buva)	Derivados da glicina
2005	<i>Conyza canadensis</i> (buva)	Derivados da glicina
2006	<i>Oryza sativa</i> (arroz-vermelho)	Inibidores da ALS
2006	<i>Euphorbia heterophylla</i> (leiteiro)	Inibidores da ALS
	(Resistência múltipla)	Derivados da glicina
2006	<i>Bidens subalternans</i> (picão-preto)	Inibidores da ALS
	(Resistência múltipla)	Inibidores do FS II
2008	<i>Digitaria insularis</i> (capim-amargoso)	Derivados da glicina
2009	<i>Echinochloa crusgalli</i> (capim-arroz)	Inibidores da ALS
	(Resistência múltipla)	Auxinas sintéticas

tipos resistentes. Grande esforço está sendo realizado para encontrar moléculas ativas com mecanismos de ação diferente dos produtos existentes, bem como no desenvolvimento de técnicas culturais que possam contribuir no manejo de plantas daninhas nas áreas que já apresentam casos de resistência.

3. Mecanismos que Conferem Resistência

Há três mecanismos gerais que podem explicar o desenvolvimento da resistência das plantas daninhas a herbicidas, bem como influenciar o modo de ação destes produtos.

3.1 Alteração do local de ação

Segundo [Christoffoleti et al. \(1994\)](#), a molécula do herbicida pode tornar-se incapaz de exercer sua ação fitotóxica no local específico de ação dentro da planta (Figura 1). Exemplos de grupos de herbicidas que apresentam este mecanismo de resistência são os inibidores da ALS e os inibidores da ACCase ([Cortez, 2000](#)). Tal alteração pode ocorrer por mutação natural ou por mutação induzida.

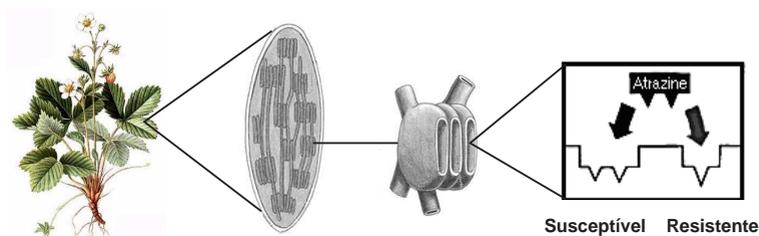


Figura 1. Representação esquemática dos locais de ação do herbicida atrazine dentro da planta (susceptível e resistente). A molécula se encaixa no substrato da planta susceptível, contudo, na planta resistente à molécula não se encaixa devido à alteração do local de ação na planta.

A probabilidade de ocorrência de mutação natural é pequena (10^{-9}). Para que algum efeito relacionado à resistência pudesse ser observado, a mutação teria que ocorrer especificamente no local de ação do herbicida, o que reduz ainda mais a possibilidade de ocorrência. Além disto, sabe-se ainda que a maioria das mutações naturais é deletéria, o que inviabiliza a geração de progênes que perpetuem a característica em questão.

A mutação induzida pode ocorrer por ação de fontes externas, como luz, raios ultravioleta e oxigênio. Contudo, não há evidências de que possam ocorrer mutações por ação dos herbicidas, uma vez que, durante a seleção de novas moléculas, qualquer composto que apresente potencial mutagênico é automaticamente eliminado em função das imposições legais do processo de registro.

A mutação é, portanto, de limitada importância para explicar a ocorrência de casos de resistência em condições de campo.

3.2 Aumento na capacidade de metabolização do herbicida

Neste caso, o biótipo resistente possui a capacidade de metabolizar a molécula do herbicida mais rapidamente do que os biótipos susceptíveis, tornando-a inativa antes que cause danos a planta ([Christoffoleti et al., 1994](#)). Este processo explica a maioria dos casos de resistência de plantas daninhas a grupos de herbicidas como inibidores da ACCase, inibidores da

ALS, inibidores dos fotossistemas I e II, inibidores da EPSPs, inibidores da divisão celular e mimetizadores da auxina (Vidal & Merotto Jr., 2001).

3.3 Compartimentalização

Os herbicidas são removidos das partes metabolicamente ativas da célula e armazenados em locais inativos, como os vacúolos das células ou tecidos localizados distantes dos sítios de ação do herbicida (Christoffoleti et al., 1994). Alguns exemplos de grupos de herbicidas que desenvolveram resistência com base neste mecanismo são os bipiridíliuns e mimetizadores da auxina.

4. Identificação das Áreas de Resistência no Campo

O termo pressão de seleção pode ser definido como o favorecimento de um indivíduo em relação a outro(s). No caso da resistência, a pressão de seleção conduz a um rápido desenvolvimento de biótipos resistentes na população.

Sabe-se que os biótipos resistentes ocorrem naturalmente em baixa frequência, e a pressão de seleção exercida pela aplicação repetitiva de um determinado herbicida ou de herbicidas diferentes, mas que apresentam o mesmo mecanismo de ação, aumenta a frequência dos indivíduos resistentes na população (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004). Portanto, o surgimento de uma planta daninha resistente deve-se à seleção de um biótipo resistente pré-existente, que, em função da pressão de seleção, encontra condições de multiplicação.

Segundo Maxwell & Mortimer (1994), o surgimento da resistência a herbicidas pode ser identificado a campo, geralmente, quando pelo menos 30% das plantas mostram-se resistentes (Tabela 2). Normalmente, a resistência apresenta-se em manchas, aumentando a sua proporção com a aplicação repetitiva do herbicida, dominando finalmente a área (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004).

Tabela 2. Evolução da resistência em uma população de biótipos de plantas daninhas resistentes. Fonte: Adaptado de Kissmann (1996).

Ano	Nº de plantas resistentes	Nº de plantas sensíveis	% de controle	Evolução
0	1	1.000.000	99,9999	Imperceptível
1	5	100.000	99,999	Imperceptível
2	10	10.000	99,99	Imperceptível
3	100	1.000	99,9	Imperceptível
4	1.000	100	99	Imperceptível
5	10.000	10	90	Pouco perceptível
6	100.000	5	80	Perceptível
7	1.000.000	1	50	Evidente

5. Período de Tempo Para o Desenvolvimento da Resistência

A frequência inicial do genoma resistente é um dos principais fatores que afetam o desenvolvimento da resistência (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004). Conforme Vidal & Fleck (1997), quanto maior a frequência inicial do biótipo resistente, provavelmente, em menor período de tempo aumentará a proporção de indivíduos resistentes na população com as aplicações sucessivas do herbicida selecionador. Portanto, o período para a seleção de biótipos resistentes pode variar em função do mecanismo de ação do herbicida (Tabela 3).

Tabela 3. Tempo para desenvolvimento da resistência para herbicidas de diversos mecanismos de ação. Fonte: Kissmann (1996).

Herbicida ou mecanismo de ação	Introdução no mercado	Identificação do primeiro caso de resistência	Local
2,4-D	1948	1957	EUA e Canadá
Triazinas	1959	1970	EUA
Propanil	1962	1991	EUA
Paraquat	1966	1980	Japão
Inibidores da EPSPs	1974	1996	Austrália
Inibidores da ACCase	1977	1982	Austrália
Inibidores da ALS	1982	1984	Austrália

Assim, apesar da seleção de biótipos resistentes ocorrer em todas as classes de herbicidas, herbicidas mais específicos e altamente eficientes como os inibidores da ALS, inibidores da ACCase e do grupo químico das triazinas apresentam centenas de relatos de seleção de populações resistentes. Por outro lado, o glyphosate e os inibidores da PROTOX, apesar da utilização intensiva na agricultura, possuem ainda poucos relatos de casos na agricultura mundial. Tal fato deve-se à menor pressão de seleção exercida por estes herbicidas, cuja ação mais ampla, tende a selecionar indivíduos resistentes mais lentamente, em comparação aos herbicidas de ação mais específica.

6. Características dos Herbicidas que Podem Contribuir no Aumento da Pressão de Seleção

Quando o herbicida é aplicado, passa a atuar como agente de seleção levando as plantas susceptíveis à morte. Por outro lado, as plantas resistentes sobrevivem e se reproduzem sem interferência das plantas susceptíveis.

No caso dos herbicidas, as características que proporcionam maior pressão de seleção são as utilizações de herbicidas com maior ação residual, aplicados repetitivamente nas mesmas áreas, em elevadas doses e com alto grau de eficiência (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004).

Embora aparentemente possa parecer contraditória, a utilização de herbicidas altamente eficientes ou aplicações de doses elevadas, proporciona grande pressão de seleção. Estas medidas tendem a controlar a maior parte ou toda a população de plantas susceptíveis, fazendo com que apenas as plantas resistentes se multipliquem e produzam descendência.

7. Características das Plantas Daninhas que Favorecem o Surgimento e a Disseminação da Resistência

A resistência ocorre por seleção natural de biótipos já existentes dentro de uma população de plantas, estando ligada a fatores genéticos, bioecológicos e agronômicos. Apenas os fatores agronômicos podem ser manipulados pelo homem na implementação de manejo da resistência e estão abordados no item 9 deste capítulo. Porém, os fatores genéticos e bioecológicos são de grande importância na avaliação de potencial de risco de resistência (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004).

Do mesmo modo, algumas características das plantas daninhas podem favorecer sua seleção em resposta à aplicação de herbicidas, proporcionando grande pressão de seleção. Tais características aumentam a chance de que indivíduos resistentes estejam presentes na população ou podem favorecer sua disseminação.

Entre as principais características genéticas relacionadas ao desenvolvimento da resistência está o modo de herança. Quando a herança é nuclear, os genes de resistência podem ser transmitidos para outro biótipo susceptível da mesma espécie e, pela recombinação sexual, seus descendentes podem vir a ser tornar biótipos resistentes a determinado mecanismo de ação de herbicidas. Vargas et al. (2001) relataram que a resistência apresentada por biótipos de *Euphorbia heterophylla* a inibidores da ALS é codificada por um gene dominante e nuclear, e que as características com este tipo de herança são disseminadas rapidamente na população.

Outros fatores importantes no estabelecimento da resistência em uma população de plantas são a frequência do alelo resistente e a taxa de cruzamento entre biótipos resistentes e susceptíveis. Quanto maiores forem estes índices, maior a probabilidade de desenvolvimento de indivíduos resistentes.

Alta densidade de infestação das plantas daninhas também favorece o rápido desenvolvimento da resistência, porque há maior probabilidade de que alguns indivíduos resistentes estejam presentes. Levando ainda em consideração o conceito de que plantas resistentes ocorrem naturalmente em populações de plantas daninhas (Kissmann, 1996), quanto mais intensa é a dispersão do pólen na espécie e, ou maior a produção de propágulos, mais rápida poderá ocorrer a disseminação dos biótipos resistentes.

Por outro lado, a manutenção de um banco de sementes diversificado no solo pode retardar o aparecimento de biótipos resistentes a um deter-

minado herbicida (Christoffoleti et al., 2000). Quanto maior o período de dormência das sementes de uma espécie de planta daninha, maior será o tempo necessário para esgotar o banco de sementes do biótipo susceptível no solo.

8. Diagnóstico da Resistência a Campo

A suposta existência de resistência geralmente está baseada no fato de que houve controle insatisfatório de plantas daninhas após a aplicação de determinado tratamento herbicida. No entanto, em muitas situações esta constatação pode estar associada não à seleção de biótipos resistentes, mas sim a falhas de controle decorrente do uso inadequado dos herbicidas ou ainda a condições não controláveis durante ou após a aplicação (as condições climáticas, por exemplo).

Caso sejam identificadas falhas no controle de uma ou mais espécies de plantas daninhas após a aplicação do herbicida recomendado, é necessário compreender que as causas de falhas no controle podem ser resultantes de diversos fatores. Portanto, a resistência só pode ser considerada a causa possível quando os outros fatores tiverem sido eliminados (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004).

O primeiro passo é avaliar a possibilidade de falhas na aplicação do herbicida. Entre os fatores a serem analisados inicialmente destaca-se a eficácia do herbicida utilizado para a espécie em questão, considerando-se a adequação de dose, época de aplicação, calibração dos equipamentos, volume de calda, adjuvantes e condições ambientais recomendadas para a aplicação. A não utilização dos parâmetros recomendados para estas variáveis leva com frequência à observação de falhas de controle no campo.

Depois de eliminar todas as possibilidades de falhas nos itens relacionados à tecnologia de aplicação, é importante observar se as falhas em determinada área ocorrem em uma ou mais espécies de plantas daninhas. Quando as falhas de controle observadas estão relacionadas ao grande número de espécies diferentes numa mesma área, há uma evidente tendência de que possa se tratar de falha de aplicação e não de resistência. Uma indicação forte de surgimento de resistência ocorre quando o herbicida perde eficiência de controle apenas sobre uma espécie, e não para as demais plantas daninhas da área. Considerando-se que um número reduzido de espécies (ou, mais comumente, uma única espécie) não foi adequadamente controlado pelo tratamento herbicida passa a ser importante investigar o histórico da área.

Em áreas onde o herbicida, ou outros herbicidas do mesmo mecanismo de ação, vem sendo utilizado por vários anos consecutivos é maior a probabilidade de seleção de biótipos resistentes, em comparação com áreas onde se realiza a rotação de métodos de controle e de mecanismos de ação de herbicidas. Em relação ao histórico da área, é útil também descobrir se a

espécie suspeita de resistência vinha sendo controlada eficientemente pelo mesmo tratamento nas aplicações anteriores, e se o declínio do controle foi gradual ou súbito.

Se após estas investigações a suposição de resistência ainda permanecer não esclarecida, é necessário colher sementes das plantas suspeitas e semeá-las em vasos. Posteriormente, aplica-se doses crescentes com os herbicidas suspeitos de resistência e avalia-se comparativamente com biótipos sensíveis, ou seja, coletados de um local que nunca houve aplicação de herbicidas. A grande limitação deste teste prático consiste no período relativamente longo para a obtenção dos resultados finais.

Uma alternativa para determinar a resistência de forma rápida e prática são os testes rápidos. Um dos testes, proposto por [Monquero & Christoffoleti \(2001\)](#), detecta a resistência aos herbicidas inibidores da ALS em cerca de três dias. O segundo é o Syngenta Quick-test, que utiliza as plantas do campo e os resultados são obtidos em cerca de duas a quatro semanas ([Christoffoleti & López-Ovejero, 2004](#)).

9. Estratégias Para Evitar o Surgimento e a Disseminação de Resistência

Idealmente, o manejo de plantas daninhas em uma propriedade deve ser planejado em longo prazo, por meio de um sistema integrado com diferentes métodos de controle e um planejamento de rotação de cultivos. As práticas para prevenir ou manejar a resistência sempre levam em consideração duas preocupações-chave: reduzir a pressão de seleção na área e controlar os indivíduos resistentes antes que se reproduzam. Tendo como base estes dois critérios, as principais práticas recomendadas são:

9.1 Rotação de culturas

A rotação de culturas reduz o sucesso intrínseco das plantas daninhas que estão sincronizadas com a cultura. Portanto, a semeadura alternada de diferentes cultivos nas safras, tais como espécies anuais, forrageiras e pastagens, permite a utilização de herbicidas de diferentes mecanismos de ação, ou ainda, permite a utilização de métodos alternativos de controle, diferentes do químico. Recentemente, tem ganhado importância também os sistemas de integração lavoura-pecuária.

9.2 Rotação de mecanismo de ação de herbicidas

Nas culturas que dependem exclusivamente de controle químico, é fundamental planejar a rotação de herbicidas com mecanismos de ação diferenciados, porém efetivos sobre o mesmo espectro de plantas daninhas. Por exemplo, uma das alternativas de manejo de população resistente ao glyphosate é a aplicação sequencial ou em rotação com graminicidas. É importante ainda minimizar as aplicações de herbicidas que possuem efeito

residual prolongado no solo. Outros pontos importantes e que devem ser explorados referem-se à associação de herbicidas com diferentes mecanismos de ação, à otimização da dose, da época e ao número de aplicações do herbicida. Quando se depende exclusivamente do método químico para o controle de plantas daninhas, a rotação de mecanismos de ação é uma das estratégias mais importantes que devem ser utilizadas para evitar a resistência.

9.3 Métodos alternativos de controle

A utilização de um sistema integrado de manejo que envolva métodos alternativos de controle pode ser bastante eficiente na prevenção da resistência. As utilizações de enxadas rotativas e cultivadores seletivos constituem práticas que reduzem a pressão de seleção na população de plantas daninhas. O cultivo mecânico pode substituir ainda o controle químico ou ser utilizado nas entrelinhas e os herbicidas serem aplicados nas linhas da cultura.

Nos locais onde as possibilidades de alternância de métodos de controle são reduzidas, como no caso das áreas de plantio direto, a rotação de culturas passa a ter um papel ainda mais relevante na prevenção ou manejo da resistência.

Apesar de pouco utilizado, quando bem estabelecido, o controle biológico pode ser eficiente no manejo das plantas daninhas. Prates et al. (1999a,b) verificaram que a parte aérea de *Leucaena leucocephala*, tanto em cobertura como incorporada ao solo, reduziu a população de plantas daninhas presentes na cultura do milho.

9.4 Práticas culturais

A utilização de práticas que fortaleçam a capacidade competitiva da cultura, objetivando seu rápido desenvolvimento e estabelecimento, em detrimento ao da planta daninha, pode também representar importante contribuição dentro de um sistema integrado de manejo. Em áreas de plantio direto, por exemplo, o planejamento da dessecação de manejo até a aplicação de herbicidas em pós-emergência, passando pela semeadura e emergência da cultura, deve ser feito de modo que maximize a velocidade da emergência da cultura em detrimento ao da infestação. A vantagem competitiva imposta pelo desenvolvimento inicial mais rápido da cultura favorece e facilita o manejo posterior das plantas daninhas. Um exemplo bastante aplicável a este ponto é o tempo que se passa entre a dessecação de manejo e a semeadura em áreas de plantio direto. Embora a utilização do sistema de “aplique-plante” seja problemática em áreas de grande cobertura vegetal, de modo geral, menor período entre a dessecação de manejo e a semeadura propicia a emergência da cultura antes das plantas daninhas, o que proporciona significativa vantagem competitiva no crescimento inicial e na produtividade das culturas de soja e milho (Oliveira Jr. et al., 2006; Constantin et al., 2007).

9.5 Monitoramento após a aplicação dos herbicidas

O monitoramento da evolução inicial (detecção precoce) é um passo importante para manejar a resistência. Por exemplo, o monitoramento das manchas de plantas daninhas com padrão diferente ao de problemas na aplicação propicia a eliminação de focos iniciais de resistência. Identificado um foco de resistência, é importante evitar que as plantas suspeitas se reproduzam.

9.6 Prevenção da disseminação de propágulos de plantas daninhas

Tanto na prevenção como no manejo da resistência é necessário adotar procedimentos que previnam infestações e disseminações de plantas daninhas. Por outro lado, a elevada capacidade reprodutiva das plantas daninhas é uma das suas principais características. O controle da produção de propágulos pode reduzir significativamente a capacidade e a velocidade de disseminação de plantas resistentes. Além do controle durante o período em que as culturas permanecem no campo, é importante ter em mente a necessidade de evitar a reprodução destas plantas também durante o período de entressafra. Um excelente exemplo de perpetuação é a tiririca (*Cyperus rotundus*), que se reproduz por meio de bulbos, rizomas, tubérculos e sementes. Espécies como o *Sorghum halepense* produzem até 80 mil sementes, enquanto a *Arthemisia biennis* pode produzir cerca de um milhão de sementes por planta (Brighenti, 2001).

10. Ocorrência de Resistência de Plantas Daninhas Segundo o Mecanismo de Ação dos Herbicidas

10.1 Mimetizadores da auxina

Considerando o uso intensivo desta classe de herbicidas desde a década de 40, relativamente poucos casos de resistência têm surgido. No total, 28 espécies desenvolveram resistência a este grupo de herbicidas, muitas das quais pelo uso repetido no controle de plantas daninhas em trigo (*Papaver rhoeas* na Espanha, *Sinapsis arvensis* no Canadá e *Matricaria perforata* na França) e arroz (*Fimbristylis miliacea* na Malásia, *Limnocharis flava* na Indonésia e *Sphenoclea zeylandica* nas Filipinas e na Malásia). No entanto, o impacto econômico tem sido pequeno, devido ao grande número de alternativas que controlam com sucesso as espécies resistentes.

No Brasil, biótipos de *Echinochloa crusgalli* e *E. crus-gavonis* resistentes à quinclorac foram identificados em lavouras de arroz no Rio Grande do Sul durante o ano de 1999 (Eberhardt et al., 2000; Menezes & Ramirez, 2000; Merotto Jr. et al., 2000). Em 2009, identificou-se a ocorrência de resistência múltipla de *E. crusgalli* a herbicidas mimetizadores da auxina e inibidores da ALS no estado do Rio Grande do Sul (Mariot et al., 2010).

10.2 Inibidores da fotossíntese

10.2.1 Inibidores do fotossistema II (inibidores da reação de Hill)

Atualmente, 67 espécies já desenvolveram resistência às triazinas, entre elas nove espécies de *Amaranthus*, seis de *Polygonum* e cinco de *Chenopodium*. As espécies resistentes mais frequentes são *Chenopodium album* (20 países), *Amaranthus retroflexus* (13), *Solanum nigrum* (11) e *Senecio vulgaris* (10). Estima-se que existam mais de três milhões de hectares infestados por espécies resistentes às triazinas, fazendo deste o problema de maior disseminação global em termos de resistência de plantas daninhas a herbicidas.

Na maioria dos casos, a resistência às triazinas (principalmente à atrazine) foi desenvolvida pela pressão de seleção, em função do uso repetido deste herbicida nas lavouras de milho. Nos Estados Unidos, populações resistentes de *Kochia scoparia*, *Chenopodium album*, *Setaria* spp. e *Polygonum* spp. foram detectadas. Curiosamente, o gene que confere resistência já foi identificado e a resistência transferida para variedades de canola, por meio de técnicas convencionais de melhoramento.

Em relação aos demais grupos químicos que estão incluídos neste mecanismo de ação, 18 espécies desenvolveram resistência às uréias, duas ao propanil e uma espécie ao bromoxynil, herbicida do grupo das nitrilas não registrado no Brasil. Uma preocupação especial tem sido levantada em relação ao uso do propanil no controle de plantas daninhas em arroz, uma vez que centenas de populações resistentes de *Echinochloa crusgalli* e *E. colona* já foram identificadas em vários países.

10.2.2 Inibidores do fotossistema I (formadores de radicais livres)

Quatro espécies resistentes aos bipiridíliuns foram identificadas em pomares no Japão em 1980. Atualmente, 23 espécies de plantas daninhas desenvolveram resistência em resposta a aplicações de paraquat e duas espécies ao diquat. No entanto, devido à limitada área infestada com biótipos resistentes e à efetividade de herbicidas alternativos no controle destas espécies, o impacto econômico até o momento não é de grande relevância. O mecanismo de resistência parece estar associado a destoxificação dos radicais superóxidos pelas enzimas superóxido-desmutase, catalase e peroxidase (Dodge, 1991). A espécie mais recente foi detectada em Ontário no Canadá (2009), com biótipos de *Solanum ptycanthum* resistentes ao paraquat.

10.3 Inibidores da formação de microtúbulos e inibidores da mitose

10.3.1 Cloroacetamidas

Apesar do uso intensivo e contínuo das cloroacetamidas nos últimos 40 anos em lavouras de milho, há registros de apenas quatro espécies

de plantas daninhas resistentes. Na China, em 1993, foi detectado o aparecimento de resistência em *Echinochloa crusgalli* em áreas de cultivo de arroz, causado pelo uso de butachlor e thiobencarb (Huang & Gressel, 1997). No ano de 2007, detectou-se em áreas cultivadas com trigo na Alemanha resistência múltipla em biótipos de *Alopecurus myosuroides* para os herbicidas chlorotoluron, fenoxaprop, flufenacet, isoproturon, mesosulfuron and pinoxaden.

10.3.2 Dinitroanilinas

Embora herbicidas como trifluralin, oryzalin e pendimethalin venham sendo utilizados nos últimos 40 anos em culturas como soja, algodão e feijão, apenas 10 espécies desenvolveram resistência às dinitroanilinas. Resistência cruzada, por meio do aumento do metabolismo, ocorre no caso de três espécies resistentes (*Alopecurus myosuroides*, *Lolium rigidum* e *Setaria viridis*). Biótipos resistentes de *Eleusine indica*, *Sorghum halepense* e *Amaranthus palmeri* surgiram após 10 ou 15 anos de utilização de trifluralin em algodão no sudeste dos Estados Unidos. Populações resistentes de *Setaria viridis* também foram detectadas após 15 a 20 anos de uso de trifluralin no norte dos Estados Unidos e Canadá. Em função das notificações de observações de populações resistentes, *E. indica* parece ser a espécie com maior distribuição.

No Brasil, Vidal et al. (2006) verificaram que um biótipo de *E. indica* originado do Mato Grosso foi 18 vezes menos sensível ao sethoxydim do que o biótipo susceptível. Os autores constataram ainda resistência cruzada ao fenoxaprop, cyhalofop, propaquizafop e butoxydim para o biótipo estudado.

10.3.3 Tiocarbamatos

Avena fatua é uma das espécies com biótipos resistentes que foram inicialmente identificadas nos estados americanos de Montana e Idaho, envolvendo herbicidas não registrados para uso atualmente no Brasil (difenzoquat e trialate). Há, ainda, casos comprovados de três espécies resistentes do gênero *Echinochloa*, pelo uso repetido de thiobencarb em lavouras de arroz. Atualmente, há oito espécies resistentes a este grupo químico (Heap, 2011).

10.4 Inibidores da PROTOX

Em 2001, foi detectado o primeiro caso com biótipos resistentes de *Amaranthus rudis* em áreas de cultivo de soja nos Estados Unidos. Posteriormente, populações resistentes de *Ambrosia artemisifolia* foram relatadas neste mesmo país em 2005 (Heap, 2011).

No Brasil, foram identificados biótipos de *Euphorbia heterophylla* com resistência múltipla aos herbicidas inibidores da PROTOX e inibidores da ALS (acifluorfen, cloransulam, diclosulam, flumetsulam, flumiclorac, fomesafen, imazethapyr, lactofen, metsulfuron e nicosulfuron). Estes casos foram constatados em lavouras de milho e soja durante o ano de 2004 (Trezzi et al., 2005).

10.5 Inibidores da síntese de carotenóides

Há quatro casos confirmados de resistência ao amitrole (herbicida do grupo químico dos triazoles, não registrado para uso no Brasil), envolvendo as espécies *Polygonum aviculare*, *Poa annua* e *Agrostis stolonifera* em pomares da Bélgica e *Lolium rigidum* em leitos de rodovias da Austrália (Powles & Howat, 1990). Na Austrália, foram detectados em 2006 casos de resistência múltipla com biótipos de *Raphanus raphanistrum*, envolvendo herbicidas inibidores da ALS, inibidores da síntese de carotenóides e mimetizadores da auxina.

10.6 Inibidores da ACCase

Trinta e nove espécies de gramíneas já desenvolveram resistência aos inibidores da ACCase. As primeiras ocorrências foram relatadas pelo uso de diclofop-methyl para o controle de gramíneas em trigo. Espécies de *Lolium* spp. desenvolveram resistência ao diclofop e a outros inibidores da ACCase na Austrália, Chile, França, Arábia Saudita, Espanha, Reino Unido e Estados Unidos. De forma similar, *Avena* spp. desenvolveu resistência a este grupo de herbicidas na Austrália, Canadá, Chile, África do Sul, Reino Unido e Estados Unidos. Também de considerável importância econômica são os casos de resistência de *Phalaris* spp. no México e de *Setaria* spp. na América do Norte.

Kuk et al. (2000) descreveram biótipos de *Lolium* spp. que apresentavam não só resistência cruzada a ariloxifenoxipropionatos e ciclohexanodionas, mas também resistência múltipla a chlorsulfuron (inibidor da ALS).

Diversos casos foram confirmados no Brasil, envolvendo espécies resistentes a herbicidas deste grupo: *Brachiaria plantaginea* (Christoffoleti et al., 1998; Gazziero et al., 2000) *Digitaria ciliaris* (López-Ovejero et al., 2005) e *Eleusine indica* (Vidal et al., 2006). Estas constatações assumem grande importância econômica para o controle de gramíneas na cultura da soja não transgênica, devido à pequena disponibilidade de herbicidas seletivos que controlam com eficiência as espécies em condições de pré-emergência, especialmente nas áreas de plantio direto. Aliado a este fato, há dificuldades de se utilizar graminicidas pré-emergentes, visto que estes herbicidas apresentam elevada retenção na matéria orgânica em áreas de plantio direto (Christoffoleti & López-Ovejero, 2004).

10.7 Inibidores da ALS

10.7.1 Imidazolinonas

A maior parte das plantas daninhas resistentes às imidazolinonas também o são em relação às sulfoniluréias. Os primeiros relatos no Brasil de resistência cruzada envolvendo herbicidas deste grupo ocorreram com *Euphorbia heterophylla* (1992) e *Bidens pilosa* (1993) em áreas de cultivo de soja (Christoffoleti et al., 1996), principalmente nos estados de Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul (Ponchio, 1997). Posteriormente, biótipos de *Bidens subalternans* (1996), *Sagittaria montevidensis* (1999), *Raphanus sativus* (2001), *Parthenium hysterophorus* (2004) e *Oryza sativa* (2006) resistentes a imidazolinonas foram detectados em vários estados brasileiros (Monquero et al., 2000; Noldin et al., 2000; Theisen, 2004; Gazziero et al., 2006; Heap, 2011).

O caso mais importante tem sido a resistência múltipla envolvendo o amendoim-bravo (*Euphorbia heterophylla*) em algumas áreas (Trezzi et al., 2005). No Rio Grande do Sul, foram identificados também biótipos desta espécie resistentes a cloransulam, glyphosate, imazamox, imazaquin e imazethapyr.

Recentemente, surgiram biótipos de *Echinochloa crusgalli* com resistência múltipla a imazethapyr, bispyribac-Na, penoxsulan e quinclorac, em áreas cultivadas com arroz no Rio Grande do Sul (Mariot et al., 2010).

10.7.2 Sulfoniluréias

Diversas espécies de plantas daninhas já desenvolveram resistência a alguma sulfoniluréia. Na maior parte dos casos, o desenvolvimento de resistência está associado à alteração do local de ligação da ALS nas plantas resistentes.

O primeiro caso de resistência às sulfoniluréias (*Kochia* spp.) foi documentado em 1988, após o uso do chlorsulfuron em trigo por sete anos consecutivos em seis estados diferentes dos Estados Unidos, em função do aumento na velocidade de degradação interna do produto pelas plantas. Estas plantas daninhas têm graus variáveis de resistência cruzada com outros grupos como as imidazolinonas (Sivakumaran et al., 1993).

Existem no Brasil biótipos de *Euphorbia heterophylla*, *Bidens pilosa*, *Bidens subalternans*, *Sagittaria montevidensis*, *Cyperus difformis*, *Fimbristylis miliacea*, *Raphanus sativus* e, mais recentemente, de *Parthenium hysterophorus* com resistência cruzada a sulfoniluréias e imidazolinonas. Para esta última espécie, a resistência já foi confirmada para pelo menos cinco herbicidas diferentes (Gazziero et al., 2006). No estado do Paraná, identificou-se em 2006 biótipos de *Bidens subalternans* com resistência múltipla a atrazine, foramsulfuron e iodosulfuron-methyl-sodium.

10.7.3 Triazolopirimidas

Alguns biótipos de plantas daninhas resistentes às sulfoniluréias e imidazolinonas selecionados por um ou mais destes herbicidas apresentam resistência cruzada ao cloransulam e flumetsulam. Estes biótipos são resistentes em função da alteração no local de atuação da ALS.

10.8 Inibidores da EPSP sintase

Após longa utilização na agricultura mundial, o primeiro caso de planta daninha resistente ao glyphosate foi relatado somente em 1996 (Pratley et al., 1996). Recentemente, a intensa utilização de glyphosate em culturas geneticamente modificadas para resistência ao produto tem contribuído significativamente para seleção de biótipos resistentes. Atualmente, há 21 espécies que desenvolveram resistência aos derivados da glicina (Heap, 2011).

A primeira constatação de resistência ao glyphosate (*Lolium multiflorum*) no Brasil foi documentada em 2003, em função do uso repetido do glyphosate em pomares e vinhedos do Rio Grande do Sul (Vargas et al., 2007). Os demais casos incluem populações resistentes de *Conyza bonariensis*, *Conyza canadensis*, *Digitaria insularis* e *Euphorbia heterophylla*, principalmente nos estados do Paraná, Rio Grande do Sul e São Paulo, mas com ocorrência já verificada também em outros países da América do Sul. Em virtude da liberação para plantio de outras culturas resistentes ao glyphosate, tais como o algodão e o milho, espera-se que um número crescente de casos de resistência a este herbicida surja no decorrer dos próximos anos.

10.9 Outros mecanismos de ação

Há casos confirmados de resistência ao MSMA para *Xanthium strumarium* em lavouras de algodão em pelo menos sete estados americanos (Nimbal et al., 1995).

Referências

- Andres, A.; Concenço, G.; Melo, P.T.B.S.; Schmidt, M. & Resende, R.G., Detecção de resistência de capim-arroz (*Echinochloa* sp.) ao herbicida quinclorac em regiões orizícolas do sul do Brasil. *Planta Daninha*, 25:221–226, 2007.
- Brighenti, A.M., Biologia de plantas daninhas. In: Oliveira Jr., R.S. & Constantin, J., (Eds.). *Plantas Daninhas e seu Manejo*. Guaíba, RS: Agropecuária, 2001. p. 15–57.
- Christoffoleti, P.J.; Cortez, M.G. & Victória-Filho, R., Resistance of alexanderweed (*Brachiaria plantaginea*) to ACCase inhibitor herbicides in soybean from Paraná State – Brazil. In: *Proceedings of 38th*

- Weed Science Society of America Annual Meeting*. Champaign, EUA: WSSA, 1998. p. 65.
- Christoffoleti, P.J. & López-Ovejero, R.F., Definições e situação da resistência de plantas daninhas aos herbicidas no Brasil e no mundo. In: Christoffoleti, P.J.; López-Ovejero, R.F. & Carvalho, S.J.P., (Eds.). *Aspectos de Resistência de Plantas Daninhas a Herbicidas*. Campinas, SP: Associação Brasileira de Ação a Resistência de Plantas aos Herbicidas (HRAC-BR), 2a edição, 2004. p. 3–22.
- Christoffoleti, P.J.; Medeiros, D.; Monqueiro, P.A. & Passini, T., Plantas daninhas na cultura da soja: controle químico e resistência a herbicidas. In: Câmara, G.M.S., (Ed.). *Soja: Tecnologia da Produção*. Piracicaba, SP: ESALQ, 2000. p. 179–202.
- Christoffoleti, P.J.; Ponchio, J.A.R.; Berg, E.V.D. & Victória-Filho, R., Imidazolinone resistant *Bidens pilosa* biotypes in the Brazilian soybean areas. In: *Proceedings of 36th Weed Science Society of America Annual Meeting*. Champaign, EUA: WSSA, 1996. p. 10.
- Christoffoleti, P.J.; Victória Filho, R. & Silva, C.B., Resistência de plantas daninhas aos herbicidas. *Planta Daninha*, 12:13–20, 1994.
- Concenço, G.; Noldin, J.A.; López, N.F. & Comiotto, A., Aspectos da resistência de *Sagittaria montevidensis* ao herbicida pirazosulfuron-ethyl inibidor da ALS. *Planta Daninha*, 25:187–194, 2007.
- Constantin, J.; Oliveira Jr., R.S.; Cavalieri, S.D.; Arantes, J.G.Z.; Alonso, D.G.; Roso, A.C. & Costa, J.M., Interação entre sistemas de manejo e controle de plantas daninhas em pós-emergência afetando o desenvolvimento e a produtividade do milho. *Planta Daninha*, 25:513–520, 2007.
- Cortez, M.G., *Resistência de biótipos de Brachiaria plantaginea a herbicidas inibidores da acetil coenzima A carboxilase*. Tese – doutorado em agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2000.
- Dodge, A.D., Mechanisms of paraquat tolerance. In: Caseley, J.C.; Cussans, G.W. & Atkin, R.K., (Eds.). *Herbicide Resistance in Weeds and Crops*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 1991. p. 167–175.
- Eberhardt, D.S.; Noldin, J.A.; Gutierrez, M. & Ditttrich, R.C., Resistência de capim-arroz (*Echinochloa crusgalli*) ao herbicida quinclorac. In: *Resumos do 22^o Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2000. p. 512.
- Gazziero, D.L.P.; Brighenti, A.M.; Maciel, C.D.G.; Christoffoleti, P.J.; Adegas, F.S. & Voll, E., Resistência de amendoim-bravo aos herbicidas inibidores da enzima ALS. *Planta Daninha*, 16:117–125, 1998.

- Gazziero, D.L.P.; Brighenti, A.M. & Voll, E., Resistência cruzada da losnabranca (*Parthenium hysterophorus*) aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase. *Planta Daninha*, 24:157–162, 2006.
- Gazziero, D.L.P.; Christoffoleti, P.J.; Brighenti, A.M.; Prete, C.E.C. & Voll, E., Resistência da planta daninha capim-marmelada (*Brachiaria plantaginea*) aos herbicidas inibidores da enzima ACCase na cultura da soja. *Planta Daninha*, 18:169–180, 2000.
- Heap, I., International survey of herbicide resistant weeds. Disponível na internet em: <http://www.weedscience.org/>. Acessada em 27/janeiro/2011, 2011.
- Huang, B. & Gressel, J., Barnyardgrass (*Echinochloa crusgalli*) resistance to both butachlor and thiobencarb in China. *Resistant Pest Management Newsletter*, 9:5–7, 1997.
- Kissmann, K.G., *Resistência de Plantas Daninhas a Herbicidas*. 6a edição. São Paulo, SP: Basf Brasileira S. A., 1996. 33 p.
- Kuk, Y.I.; Burgos, N.R. & Talbert, R.E., Cross- and multiple resistance of diclofop-resistant *Lolium* spp. *Weed Sci*, 48:412–419, 2000.
- López-Ovejero, R.F.; Carvalho, S.J.P.; Nicolai, M. & Christoffoleti, P.J., Resistência de populações de capim-colchão (*Digitaria ciliaris*) aos herbicidas inibidores da acetil Co-A Carboxilase. *Planta Daninha*, 23:543–549, 2005.
- Mariot, C.H.P.; Menezes, V.G. & Souza, P.A., Resistência múltipla e cruzada de capim-arroz a herbicidas na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: *Resumos do 27º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2010. p. 1–26.
- Maxwell, B.D. & Mortimer, A.M., Selection for herbicide resistance. In: Powles, S.B. & Holtur, J.A.M., (Eds.). *Herbicide Resistance in Plants: Biology and Biochemistry*. Boca Raton, EUA: Lewis, 1994. p. 1–26.
- Menezes, V.G.; Mariot, C.H.R.; Kalsing, A. & Goulart, I.C.G.R., Arroz-vermelho (*Oryza sativa*) resistente aos herbicidas imidazolinonas. *Planta Daninha*, 27:1047–1052, 2009.
- Menezes, V.G. & Ramirez, H.V., Resistance of *Echinochloa crusgalli* (L.) Beauv. to quinclorac in flooded rice in southern Brazil. In: *Proceedings of the Third International Weed Science Congress*. Corvallis, EUA: IWSS, 2000. p. 140.
- Merotto Jr., A.; Fleck, N.G.; Reia, B. & Andres, A., Resistência de *Echinochloa* sp. à quinclorac. In: *Resumos do 22º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBPCP/Embrapa Clima Temperado, 2000. p. 513.

- Monquero, P.A. & Christoffoleti, P.J., Bioensaio rápido de determinação da sensibilidade da acetolactato sintase (ALS) a herbicidas inibidores. *Sci Agr*, 58:193–196, 2001.
- Monquero, P.A.; Christoffoleti, P.J. & Dias, C.T.S., Resistência de plantas daninhas aos herbicidas inibidores da ALS na cultura da soja (*Glycine max*). *Planta Daninha*, 18:419–425, 2000.
- Moreira, M.S.; Nicolai, M.; Carvalho, S.J.P. & Christoffoleti, P.J., Resistência de *Conyza canadensis* e *C. bonariensis* ao herbicida glyphosate. *Planta Daninha*, 25:157–164, 2007.
- Nimbal, C.I.; Shaw, D.R.; Duke, S.A. & Bird Jr., J.D., Response of MSMA-resistant and -susceptible common cocklebur (*Xanthium strumarium*) biotypes to cotton (*Gossypium hirsutum*) herbicides and cross-resistance to arsenicals and membrane disruptors. *Weed Technol*, 9:440–445, 1995.
- Noldin, J.A.; Eberhardt, D.S.; Chehade, A.T. & Dittrich, R.C., Sagitária resistente a herbicidas inibidores da ALS. In: *Resumos do 22º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2000. p. 514.
- Noldin, J.A.; Eberhardt, D.S. & Rampelotti, F.T., *Cyperus difformis* (L.) resistente a herbicidas inibidores da ALS em Santa Catarina. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2002a. p. 198.
- Noldin, J.A.; Eberhardt, D.S. & Rampelotti, F.T., *Fimbristylis miliacea* (L.) Vahl resistente a herbicidas inibidores da ALS em Santa Catarina. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2002b. p. 199.
- Oliveira Jr., 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 controle de plantas daninhas em pós-emergência afetando o desenvolvimento e a produtividade da soja. *Planta Daninha*, 24:721–732, 2006.
- Ponchio, J.A.R., *Resistência de Bidens pilosa aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato-sintase*. Tese – doutorado em agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1997.
- Powles, S.B. & Howat, P.D., Herbicide-resistant weeds in Australia. *Weed Technol*, 4:178–185, 1990.

- Prates, H.T.; Pereira Filho, I.A.; Paes, J.M.V. & Magalhães, N.M., *Efeito da parte aérea da leucena (Leucaena leucocephala (Lam) De Wit) sobre o desenvolvimento das plantas daninhas e do milho*. Sete Lagoas, MG: EMBRAPA-CNPMS, 1999a. 2 p.
- Prates, H.T.; Pires, N.M.; Pereira Filho, I.A. & Farias, T.C.L., Effect of leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam) De Wit) over the weed population on maize (*Zea mays* L.) crop. In: *Abstracts of 2nd IUPAC International Conference on Biodiversity*. Belo Horizonte: International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC), 1999b. p. 216.
- Pratley, J.; Baines, P.; Eberbach, P.; Incerti, M. & Broster, J., Glyphosate resistance in annual ryegrass. In: *Proceedings of the 11th Annual Conference of the Grassland Society of New South Wales*. Wagga Wagga, Australia: The Grassland Society of New South Wales, 1996. p. 126.
- Roman, E.S.; Vargas, L.; Rizzardi, M.A. & Mattei, R.W., Resistência de azevém (*Lolium multiflorum*) ao herbicida glyphosate. *Planta Daninha*, 22:301–306, 2004.
- Sivakumaran, K.; Mulugeta, D.; Fay, P.K. & Dyer, W.E., Differential herbicide response among sulfonyleurea-resistant *Kochia scoparia* L. accessions. *Weed Science*, 41:159–165, 1993.
- Theisen, G., Identificação de nabo (*Raphanus sativus*) resistente aos herbicidas inibidores da ALS. In: *Resumos do 24^o Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. São Paulo, SP: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas Daninhas, 2004. p. 262.
- Trezzi, M.M.; Felippi, C.L.; Mattei, H.L.; Silva, A.L.; Debastiani, C.; Vidal, R.A. & Marques, A., Multiple resistance of acetolactate synthase and protoporphyrinogen oxidase inhibitors in *Euphorbia heterophylla* biotypes. *J Environ Sci Heal B*, 40:101–109, 2005.
- Vargas, L.; Borém, A. & Silva, A.A., Herança da resistência aos herbicidas inibidores da ALS em biótipos da planta daninha *Euphorbia heterophylla*. *Planta Daninha*, 19:331–336, 2001.
- Vargas, L.; Moraes, R.M.A. & Berto, C.M., Herança da resistência de azevém (*Lolium multiflorum*) ao glyphosate. *Planta Daninha*, 25:567–571, 2007.
- Vargas, L.; Roman, E.S.; Rizzardi, M.A. & Silva, V.C., Identificação de biótipos de azevém (*Lolium multiflorum*) resistentes ao herbicida glyphosate em pomares de maçã. *Planta Daninha*, 22:617–622, 2004.
- Vidal, R.A. & Fleck, N.G., Análise do risco da ocorrência de biótipos de plantas daninhas resistentes aos herbicidas. *Planta Daninha*, 15:152–161, 1997.
- Vidal, R.A. & Merotto Jr., A., Resistência de amendoim-bravo aos herbicidas inibidores da enzima acetolactato sintase. *Planta Daninha*, 17:367–373, 1999.

- Vidal, R.A. & Merotto Jr., A., Resistência de plantas daninhas aos herbicidas. In: Vidal, R.A. & Merotto Jr., A., (Eds.). *Herbicidologia*. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2001. p. 138-148.
- Vidal, R.A.; Portes, E.S.; Lamego, F.P. & Trezzi, M.M., Resistência de *Eleusine indica* aos inibidores de ACCase. *Planta Daninha*, 24:163-171, 2006.

Absorção e Translocação de Herbicidas

Rubem Silvério de Oliveira Jr. e Marcos Antonio Bacarin

1. Absorção de Herbicidas Aplicados ao Solo

1.1 Absorção pelas partes aéreas entre a germinação e a emergência

A absorção através de estruturas vegetais jovens entre a germinação e a emergência é um sítio de entrada importante para muitos herbicidas aplicados ao solo que são ativos em sementes em germinação ou em pequenas plântulas. A parte aérea, antes da emergência, tem uma cutícula muito pouco desenvolvida, praticamente desprovida de camadas de cera, tornando-a mais permeável aos herbicidas, sendo uma rota de entrada particularmente importante em muitas espécies de gramíneas. Além disto, a Estria de Caspary não está presente nestes tecidos.

Alta pressão de vapor dos herbicidas tende a favorecer a absorção através destas estruturas. Em geral, as gramíneas têm mostrado maior absorção de herbicidas por esta via do que as dicotiledôneas. Exemplos de grupos de herbicidas com toxicidade para gramíneas que são absorvidos pela parte aérea em emergência são apresentados na Tabela 1. Em geral, os herbicidas que penetram em plântulas através do hipocótilo e da radícula também causam injúrias nestas regiões.

Tabela 1. Grupos de herbicidas e exemplos de ingredientes ativos que podem ser absorvidos no solo pelas partes aéreas entre a germinação e a emergência. Fonte: compilado de Dawson & Appleby (1994) e Rodrigues & Almeida (2005).

Famílias químicas	Herbicidas
Cloroacetamidas	Acetochlor, alachlor, butachlor, metolachlor
Difeniléteres	Oxyfluorfen
Dinitroanilinas	Trifluralin, pendimet halin
Tiocarbamatos	EPTC, butylate, molinate

1.2 Movimento radial de herbicidas

As raízes são órgãos responsáveis pela sustentação das plantas e pela absorção de água e de herbicidas a partir do solo. Caracterizam-se por apresentar epiderme desprovida de cutícula, embora em algumas espécies possa

ocorrer a cutinização da parede celular do lado mais externo das células da epiderme.

Embora não exista nenhuma barreira cuticular na região dos pelos radiculares, existe uma barreira lipídica localizada na endoderme da raiz. Nestes tecidos, todas as paredes radiais contêm uma banda fortemente impregnada com suberina (Estria de Caspary). Esta barreira é conhecida por ser altamente impermeável à água. Na endoderme, a água que se move em direção ao xilema deve penetrar no simplasto. O que acontece aos herbicidas neste ponto não está completamente claro. Sabe-se, no entanto, que a Estria de Caspary não está presente nos ápices radiculares de células endodérmicas jovens e na região basal de raízes laterais em desenvolvimento (Luxová & Champorová, 1992), o que pode representar uma importante rota de passagem dos herbicidas do apoplasto para o simplasto.

A entrada dos herbicidas pelas raízes não é tão limitada quanto pelas folhas, uma vez que nenhuma camada significativa de cera ou cutícula está presente nos locais onde a maior parte da absorção ocorre. A rota mais importante de entrada é a passagem do herbicida juntamente com a água através dos pelos radiculares nas extremidades das raízes. Isto implica na passagem através da membrana plasmática e consequente entrada no simplasto (Figura 1). A partir daí, o movimento ocorre célula a célula, via conexões citoplasmáticas (plasmodesmos), até o tecido vascular. No entanto, existe ainda a possibilidade de que a absorção ocorra via apoplasto, isto é, sem a passagem pela membrana plasmática. Neste caso, a translocação ocorre via espaços intercelulares e parede celular, até a Estria de Caspary (Figura 1). Uma vez que a movimentação pelo apoplasto é restrita pela Estria de Caspary, especula-se que, neste ponto, as substâncias translocadas via apoplasto poderiam acumular-se e causar a perda de seletividade da membrana plasmática. A perda da seletividade possibilitaria a passagem para o simplasto. Neste caso, a denominação mais correta para este tipo de transporte seria movimento aposimplástico.

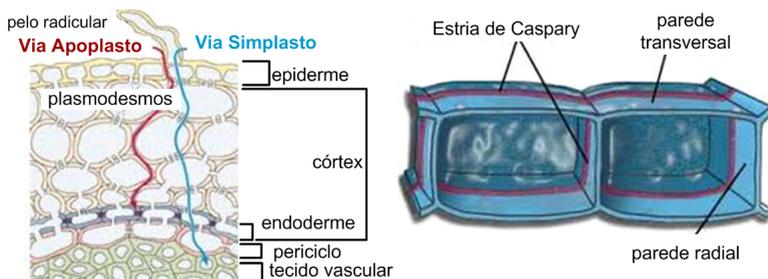


Figura 1. Corte longitudinal da extremidade da raiz, indicando o movimento pelo simplasto e pelo apoplasto. À direita, detalhe da endoderme, mostrando a Estria de Caspary. Fontes: Rocha (2011) e Frans & Cocks (2011).

1.3 Penetração no simplasto

Para que um soluto entre ou saia do protoplasto da célula ou penetre em uma organela celular, ele deve atravessar uma membrana celular pelo menos uma vez. Dependendo da natureza do soluto, duas rotas para o movimento através da membrana podem ser possíveis. A primeira de forma passiva, que se relaciona somente à diferença de concentração do soluto entre dois pontos diferentes, ou seja, ocorre a favor do gradiente de potencial eletroquímico. A segunda ocorre de forma ativa, isto é, com gasto de energia metabólica, pois o movimento de partículas ocorre contra o gradiente de potencial eletroquímico. Tais conceitos são utilizados tanto para as substâncias aplicadas ao solo ou às plantas, uma vez que, em ambos os casos, há necessidade de atravessar a membrana plasmática para chegar ao simplasto.

1.3.1 Transporte passivo

Considera-se que o movimento da maioria dos herbicidas através de membranas celulares é passivo, por difusão simples através da bicamada lipídica, embora alguns ocupem carreadores bastante específicos.

A membrana plasmática é uma estrutura lipoprotéica, extremamente fina (8 a 10 nm), que separa o protoplasto do meio exterior. Constitui uma barreira à livre movimentação de solutos, controlando o fluxo destes para dentro e para fora das células. Consiste de uma dupla camada lipídica com o exterior hidrofílico e o interior lipofílico, na qual se encontram associadas as proteínas, as quais podem ser integrais ou periféricas.

Salisbury & Ross (1990) postularam quatro conceitos básicos com respeito à difusão passiva através da membrana plasmática, os quais podem ser considerados fundamentais para o entendimento do processo de difusão:

- As células devem estar em funcionamento normal. Quando em funcionamento anormal, a permeabilidade aumenta para todos os solutos.
- Moléculas de água e gases dissolvidos (O_2 , CO_2 , N_2) penetram livremente nas células.
- Moléculas hidrofílicas penetram através das membranas numa taxa inversamente proporcional ao seu tamanho molecular.
- Moléculas lipofílicas penetram as membranas numa taxa diretamente proporcional a sua solubilidade lipofílica, e esta taxa é independente de seu tamanho molecular.

1.3.1.1 Movimento de solutos através da membrana por difusão

Se um soluto é suficientemente solúvel em lipídeos, o movimento direto através da bicamada lipídica da membrana pode ser possível. Para que este tipo de movimento ocorra, um soluto presente na solução aquosa deve primeiro dissolver-se no interior hidrofóbico da membrana, mover-se pela

bicamada, e então reentrar a solução aquosa no outro lado da membrana. Quando isto acontece por difusão, o movimento de soluto através da membrana ocorre a partir de uma maior concentração para uma menor concentração numa taxa descrita por [Briskin \(1994\)](#) como:

$$\phi = D_j K_j (C^o - C^i) / \Delta x \quad (1)$$

onde: ϕ é o fluxo de soluto através da membrana; C^o e C^i são, respectivamente, as concentrações externa e interna do soluto em relação à membrana; D_j é o coeficiente de difusão do soluto na membrana; K_j é o coeficiente de partição e x representa a espessura da bicamada lipídica. O gradiente de concentração do herbicida entre os lados da membrana representa, portanto, o “tamanho” da força motriz que move o herbicida através da mesma.

Além do gradiente de concentração, outro fator muito importante para a difusão é o coeficiente de partição do herbicida dentro da membrana, que indica maior ou menor facilidade de passagem do soluto. Herbicidas lipofílicos são capazes de difundir-se mais livremente do que os hidrofílicos. As propriedades lipofílicas/hidrofílicas dos herbicidas podem ser estimadas por meio do seu coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}). Herbicidas com maiores valores de K_{ow} apresentam maior lipofílicidade.

Critérios experimentais que suportam a hipótese da difusão passiva de herbicidas incluem a saturação da absorção após o equilíbrio das concentrações externa/interna, a absorção é proporcional às concentrações externas, o efluxo do herbicida é rápido, o coeficiente de absorção em função da temperatura (Q_{10}) é menor do que 2 e o processo é insensível a inibidores metabólicos ([Sterling, 1994](#)).

Moléculas de herbicida em contato com a raiz parecem se mover para dentro por simples difusão. [Price & Balke \(1982\)](#) demonstraram, por exemplo, que a concentração de atrazine dentro de raízes destacadas de *Abutilon theophrasti* torna-se igual à concentração externa em 30 minutos e que não são observadas no interior das células concentrações acima da externa. Além disto, os valores de Q_{10} para a absorção de atrazine neste tecido foram entre 1,3 e 1,4, sugerindo um movimento por difusão passiva.

1.3.2 Transporte ativo

Segundo [Sterling \(1994\)](#), as duas principais características que indicam o envolvimento de carreadores na absorção de herbicidas são o acúmulo contra um gradiente de concentração ou potencial eletroquímico e a redução da absorção na presença de inibidores metabólicos. Para os íons e as substâncias que contém grupamentos polares, o ambiente hidrofílico do interior da bicamada lipídica representa uma barreira significativa ao movimento através da membrana. O movimento transmembrana destes solutos

envolve necessariamente a atividade de proteínas que funcionam como sistemas de transporte. Estes sistemas associados às membranas podem ser classificados como “bombas”, “carreadores” ou “canais”.

1.3.2.1 Bombas iônicas

Pelo termo bomba iônica, entende-se uma proteína complexa ligada à membrana, imersa na sua camada lipídica e capaz de transportar (“bombear”) íons do ambiente exterior para dentro da célula ou de suas organelas. Uma propriedade destas bombas é a sua capacidade de transportar íons contra um gradiente eletroquímico, com gasto de energia metabólica (Kolek & Holobradá, 1992).

Embora algumas proteínas componentes da membrana tenham funções relacionadas aos processos metabólicos que ocorrem dentro das plantas, outras estão envolvidas no transporte de substâncias através da membrana. A mais importante destas proteínas é a H^+ -ATPase, envolvida no estabelecimento e na manutenção de um gradiente de íons H^+ entre o citossol e o meio externo. As bombas são normalmente chamadas “sistemas de transporte primário” (uniporte) (Figura 2) por serem sistemas de transporte que unem reações químicas de liberação de energia (por exemplo, a hidrólise de ATP) ao movimento transmembrana de uma substância. Considera-se que as bombas iônicas possam transportar qualquer íon em uma direção e que são capazes de formar um potencial elétrico negativo na membrana. A extrusão de H^+ por meio destas bombas, com gasto de ATP, gera um gradiente de pH e de cargas elétricas, o qual é considerado como a força motriz para o transporte de cátions, ânions e de substâncias orgânicas como aminoácidos e sacarídeos (Kolek & Holobradá, 1992). Com o funcionamento da ATPase, um gradiente de pH de 1,7 unidades (ou mais) é estabelecido entre os lados da membrana na maioria das células (o lado externo à membrana tem um pH entre 5,0–5,5, ao passo que o citoplasma tem pH 7,2–8,0). Segundo Dan Hess (1994a), os gradientes eletroquímicos são importantes para muitos processos nas células vegetais, incluindo o movimento de alguns herbicidas através das membranas.

1.3.2.2 Carreadores

Outras proteínas de transporte em membranas são os “carreadores” e os “canais”. Estes sistemas de transporte não estão conectados diretamente a reações químicas, e gastam indiretamente a energia de gradientes eletroquímicos produzidos pelo transporte ativo primário, sendo denominados “sistemas de transporte secundários”.

No caso dos carreadores, o movimento transmembrana ocorre em face de uma série de mudanças conformacionais na proteína, associadas à ligação, translocação através da membrana e liberação da substância. Os carreadores podem transportar substâncias iônicas e não iônicas através da membrana. Se apenas uma substância move-se através da membrana,

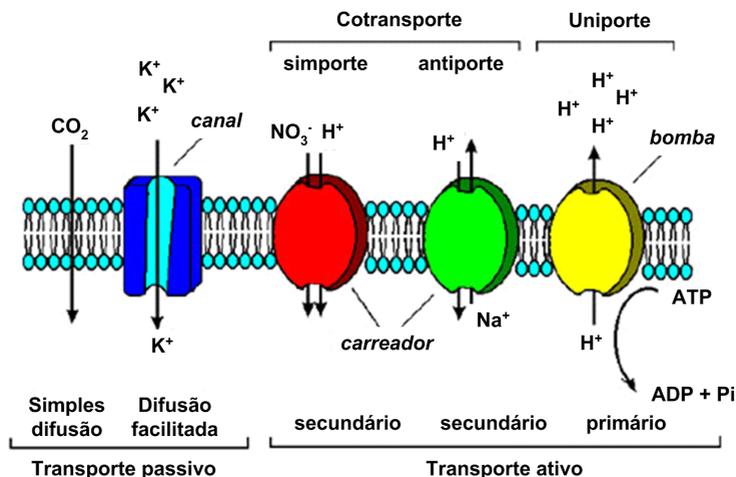


Figura 2. Tipos de transporte e da atividade dos carreadores, canais e bombas. Substâncias apolares (CO_2) permeiam a membrana livremente.

Como a célula vegetal possui um potencial transmembrana negativo, cátions (como K^+) podem ser transportados por canais, mas os ânions (como o NO_3^-) precisam ser transportados por carreadores. O transporte com carreadores utiliza a energia que foi gerada pela bomba para criar um gradiente de prótons. Do mesmo modo, a saída de cátions (como o Na^+)

da célula também precisa ser realizada com gasto de energia pelos carreadores. Fonte: modificado de Taiz & Zeiger (2004) apud Santos & Souza (2011).

é denominado de carreador uniporte (Figura 2). Quando o movimento de uma substância ocorre juntamente com o movimento de outra substância (usualmente íons H^+), é denominado de cotransporte. Em relação à direção do transporte, se o movimento das substâncias ocorre na mesma direção o cotransporte é denominado simporte ou, se ocorre em direções opostas, de antiporte (Figura 2).

Até o momento, sabe-se que apenas três herbicidas movem-se através da membrana plasmática por intermédio de processos mediados por carreadores. São eles o paraquat, o 2,4-D e o glyphosate.

Absorção de 2,4-D: Donaldson et al. (1973) foram os primeiros a demonstrar que a absorção de 2,4-D, em raízes de cevada, era dependente do suprimento de energia metabólica. Posteriormente, Rubery (1977) concluiu que havia um componente saturável mediado por carreadores na absorção do 2,4-D, além da difusão passiva do ácido não dissociado. Estas evidências suportam, de forma consistente,

a hipótese de que exista um carreador envolvido no mecanismo de movimentação do 2,4-D através das membranas.

Absorção de paraquat: Em solução aquosa, o paraquat existe na forma de cátion divalente, o que dificulta e torna improvável que o mesmo difunda-se passivamente através da bicamada lipídica das membranas celulares. Até recentemente, no entanto, poucas evidências tinham sido mostradas para um mecanismo de transporte do paraquat em membranas de células vegetais. Evidências sugerem que o paraquat é absorvido por células da epiderme e do córtex radicular de raízes de milho via um sistema mediado por proteínas, que funciona normalmente no transporte de diaminas através da membrana (Hart et al., 1992). Neste trabalho, os autores propõem que a putrescina (substância biológica presente em células vegetais) e o paraquat compartilham um sistema de transporte comum na plasmalema. A especificidade de ligação ao substrato parece estar relacionada à distribuição de cargas positivas dos grupamentos amina. As distâncias de cargas dos grupamentos poliaminas na putrescina e na cadaverina são similares à do paraquat e ambas inibem competitivamente a absorção deste herbicida. Outros experimentos mostram que o paraquat pode inibir o componente saturável da absorção da putrescina e da cadaverina. A força motriz para este carreador parece ser a diferença de potencial elétrico através da membrana plasmática (Di-Tomaso et al., 1992), que está entre -120 e -200 mV. Estes mesmos estudos mostram que o sistema de transporte de poliaminas não é o mesmo sistema carreador usado para cátions divalentes inorgânicos (como o cálcio e o magnésio). A absorção de paraquat por um sistema que normalmente funciona no transporte da putrescina poderia explicar a natureza praticamente não seletiva deste herbicida.

Absorção do glyphosate: O glyphosate inibe a absorção de fosfato em *Vicia faba*. Variando-se a concentração, observa-se que a absorção de glyphosate exibe uma fase saturável em baixas concentrações do herbicida (0,5 a 3 μM), e outra fase de absorção linear em concentrações mais altas (maiores que 100 μM). A absorção de glyphosate é inibida por inibidores metabólicos, como o ácido *p*-cloromercuribenzeno sulfônico, a azida sódica e a carbonil-cianeto-*m*-clorofenilhidrazona, sendo que a inibição é muito maior em baixas concentrações do que em altas concentrações do produto. A cinética de absorção indica que o componente saturável do transporte de glyphosate é competitivamente inibido por fosfato. Conclui-se que o carreador de fosfato é capaz de ligar-se ao glyphosate e transportá-lo pela membrana (Deis & Delrot, 1993).

1.3.2.3 Canais iônicos

Os canais são similares aos carreadores uniporte no que diz respeito à medição do transporte de um único soluto através da membrana, mas diferem deste em relação ao mecanismo através do qual o movimento transmembrana ocorre. Neste caso, o movimento ocorre através de um poro proteínico cuja abertura e fechamento são intimamente relacionados a sinais químicos ou ambientais (Hedrich & Schroeder, 1989) e permitem um movimento de difusão de íons a favor de seus gradientes eletroquímicos. Esta diferença no transporte entre carreadores e canais iônicos explica porque o transporte de solutos pelos canais é mais rápido do que o observado por carreadores. Enquanto os carreadores podem estar envolvidos no transporte de íons ou de moléculas orgânicas, os canais são tipicamente envolvidos apenas no transporte de íons.

2. Absorção Foliar

A maioria dos eventos que acontecem após a aplicação de um herbicida à parte aérea das plantas está relacionada às propriedades físicas e químicas da camada que recobre a maior parte das plantas. Por isto, são discutidas brevemente a seguir algumas das principais características de duas estruturas fundamentais no entendimento da absorção foliar: a cutícula e os estômatos.

2.1 Cutícula

A cutícula é uma camada muito fina (espessura varia de 0,1 a 10 μm) que recobre as partes aéreas não suberizadas dos vegetais (Figura 3). A estrutura da cutícula consiste de cutina, cera epicuticular, cera embebida e pectina. A cutina, por sua vez, é composta primariamente de ácidos graxos polimerizados hidroxilados. Na cutina encontram-se grupos carboxil e hidroxil livres, existindo, portanto, um balanço lipo/hidrofílico global. O comprimento da cadeia carbônica dos ácidos graxos na cutina varia de 16 a 18 átomos de carbono. As ceras embebidas e epicuticular são principalmente alcanos de cadeia longa (C_{12} a C_{35}), com uma pequena porcentagem (10-20%) de álcoois graxos, aldeídos graxos e cetonas graxas. Para as ceras, que podem estar presente na forma cristalina ou amorfa, o comprimento da cadeia carbônica varia de 17 a 35 carbonos. A cutícula, como um todo, tem carga líquida negativa em pH fisiológico. O pH isoeletrico (pH onde a carga líquida é zero) é por volta de 3 (Dan Hess, 1994a).

2.2 Estômatos

O estômato é constituído por duas células com paredes delgadas, lúmen amplo e formato reniforme, providas de clorofila (células-guarda) (Figura 4.

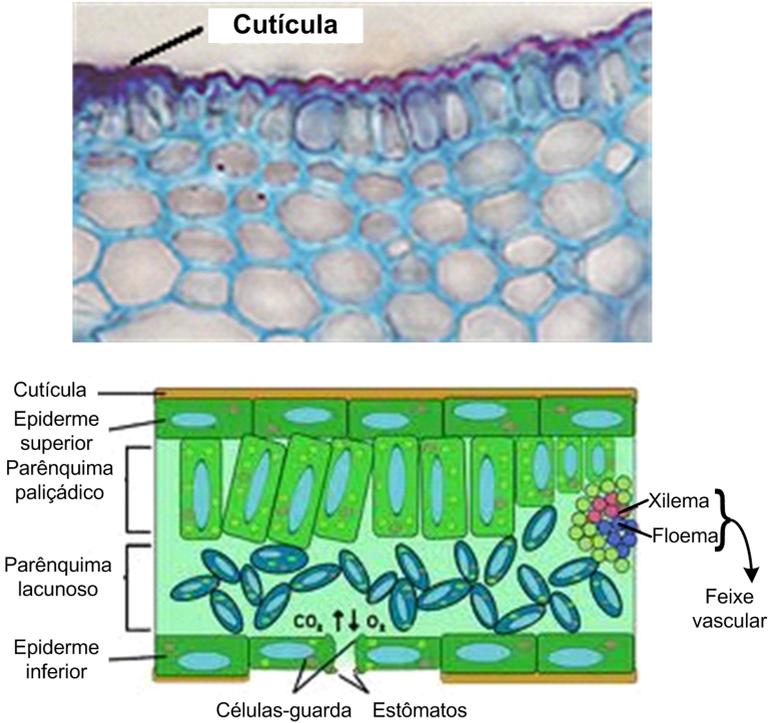


Figura 3. Acima: detalhe da epiderme foliar de *Curatella americana*, evidenciando a cutícula. Foto: Castro, N.M. e Oliveira, L.A., Fonte: [Castro \(2011a\)](#). Abaixo: resumo esquemático das partes de um corte transversal de folha, destacando a cutícula em ambas as faces da folha.

Fonte: [McKenna \(2011\)](#).

As células-guarda são acompanhadas por duas ou mais células adjacentes, desprovidas de clorofila, que são conhecidas como células subsidiárias. O orifício formado pelo curvamento das células-guarda é conhecido por poro estomático ou ostíolo. O espaço interno do estômato é conhecido por câmara sub-estomática (Figura 4). As células-guarda conectam-se às células subsidiárias por meio dos plasmodesmos. São com as células subsidiárias que as células-guarda realizam as trocas iônicas responsáveis pela variação no seu potencial osmótico, as quais determinam a entrada ou saída de água e consequente abertura/fechamento do ostíolo. A abertura dos estômatos depende de diversos fatores, principalmente luminosidade, concentração de CO_2 e disponibilidade de água nas raízes, bem como de reguladores de crescimento como ácido abscísico.

Com relação à penetração de herbicidas, os estômatos podem, potencialmente, estar envolvidos de duas formas. Primeiro, a cutícula sobre as

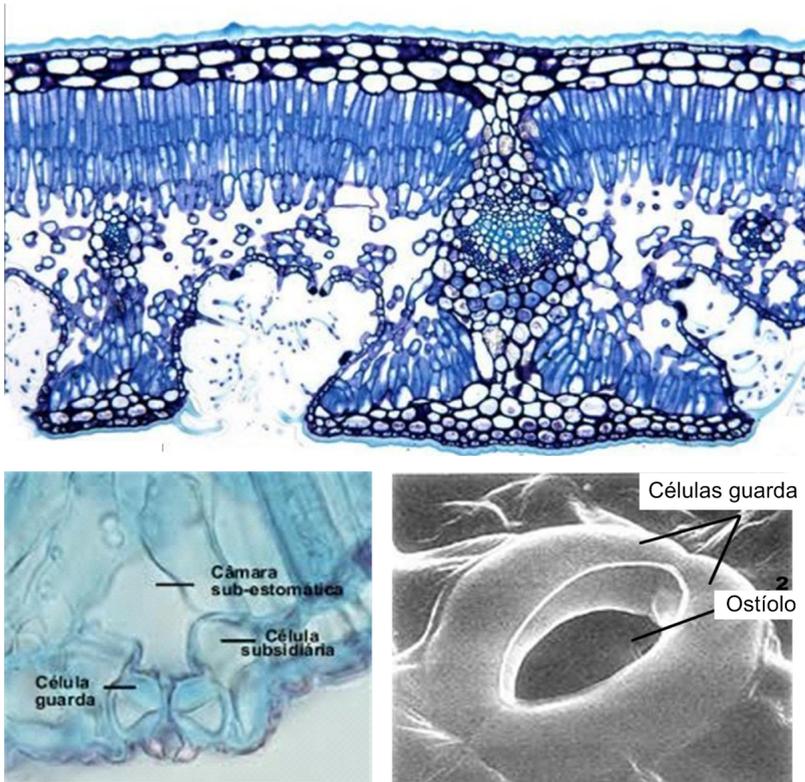


Figura 4. Acima: Seção transversal da folha de *Nerium oleander* (limbo) mostrando a epiderme adaxial (ventral) e abaxial (dorsal), parênquima paliádico (ventral e dorsal), parênquima esponjoso, drusas, feixes vasculares, bainha do feixe vascular, extensões de bainha, floema, xilema, criptas estomáticas, estômatos, tricomas tectores e cutícula espessa. Fonte: [Bittencourt Júnior \(2011\)](#). Abaixo à esquerda: detalhe de um estômato da folha de *Curatella americana* visto em corte transversal. Foto de Castro, N.M. e Oliveira, L.A., Fonte: [Castro \(2011a\)](#). Abaixo à direita: ilustração da abertura estomática. Fonte: [Castro \(2011b\)](#).

células-guarda parece mais fina e mais permeável a substâncias do que a cutícula sobre as outras células epidérmicas. Em segundo lugar, a solução pulverizada poderia, em tese, mover-se através do poro de um estômato aberto para dentro da câmara estomática, e daí para o citoplasma das células do parênquima foliar.

Embora sejam encontrados trabalhos que tenham demonstrado uma correlação direta entre frequência estomática e sensibilidade, é possível que a menor espessura da cutícula das células-guarda seja o fator de maior

importância neste caso, e não propriamente o aumento da absorção pela penetração direta pelos estômatos.

A penetração estomática é mais um processo de fluxo em massa do que um processo de difusão. Pontos importantes que devem ser considerados em relação à absorção são: a tensão de superfície do líquido, o ângulo de contato produzido pelo líquido na superfície da planta e a morfologia e composição química da parede do poro estomático. A penetração pelos poros estomáticos pode ocorrer se a tensão superficial da solução pulverizada é tal que o molhamento completo ocorre. Neste caso a tensão de superfície do líquido é menor do que a tensão crítica da superfície da folha. Quando isto não ocorre, a penetração pelo poro estomático só pode ocorrer se o ângulo de contato entre a gota pulverizada e a superfície da cutícula é menor do que o ângulo da parede do poro estomático.

Como concluíram diversos autores, a penetração estomática de gotas pulverizadas a partir de uma solução aquosa, mesmo com a adição de surfactantes, é provavelmente um processo de menor importância em aplicações de herbicidas em nível de campo.

A infiltração pelos estômatos, portanto, não é possível a menos que a tensão superficial da solução pulverizada seja significativamente reduzida pelo uso de surfactantes na formulação ou no tanque do pulverizador. A maioria dos surfactantes atualmente em uso atua aumentando a penetração cuticular, e não consegue reduzir a tensão superficial adequadamente para permitir a infiltração estomática. Recentemente, no entanto, o desenvolvimento de surfactantes à base de organossilicones proporcionou um avanço neste ponto, sendo os mesmos capazes de reduzir a tensão superficial ao ponto da infiltração pelo estômato ocorrer.

Dois tipos diferentes de mecanismos de aumento na absorção de ingredientes ativos foram mostrados para os surfactantes à base de organossilicones. Em primeiro lugar, eles podem induzir um fluxo em massa da solução pulverizada através do poro estomatal. Além disto, podem, direta ou indiretamente, aumentar a penetração cuticular. Alguns trabalhos têm demonstrado que este tipo de surfactante pode aumentar inclusive a translocação relativa do produto aplicado (Knoche, 1994).

Mesmo após a infiltração estomática, o herbicida ainda tem que penetrar uma camada fina de cutícula que existe na superfície das células da cavidade subestomática.

2.3 Absorção de formulações de herbicidas com características lipofílicas

De modo geral, as formulações de herbicidas solúveis em óleo ou emulsificadas em água são capazes de penetrar na barreira cuticular por simples difusão através dos componentes lipofílicos predominantes. A velocidade do processo depende de propriedades ligadas ao transporte (solubilidade

ou permeabilidade dentro da cutícula) e da força motriz (gradiente de concentração). A difusão de herbicidas através da camada epicuticular ocorre primariamente através daquelas ceras que estão no estado amorfo. Sabe-se, também, que a cutícula é mais fina em alguns locais da superfície foliar (por exemplo, na base dos pelos epidérmicos e também sobre as células-guarda), caracterizando estas áreas como sítios de penetração preferenciais para formulações de herbicidas lipossolúveis (Dan Hess, 1994a).

2.4 Absorção de formulações de herbicidas com características hidrofílicas

As formulações com caráter mais hidrofílico também são capazes de penetrar nas plantas através da superfície cuticular. No entanto, devido a sua baixa permeabilidade dentro da cutícula, sua taxa de movimento é significativamente menor do que os herbicidas lipofílicos. Esta penetração reduzida geralmente resulta em uma menor absorção total. As ceras epicuticulares constituem, com certeza, a barreira mais significativa para a absorção via foliar de formulações de herbicidas com caráter hidrofílico. Uma vez que a difusão ocorreu através da cera epicuticular, existem componentes polares (hidrofílicos) na cutícula para facilitar o processo de absorção. Os componentes cuticulares hidrofílicos encontram-se principalmente na cutina com seus grupamentos livres hidroxil/carboxil e nas faixas de pectina. A cutícula de forma global é hidratada, e esta água estrutural tem grande importância para o componente hidrofílico da difusão de herbicidas solúveis em água. Somado à penetração natural por difusão, interrupções na camada cuticular causadas por chuvas, insetos, ventos ou outros agentes que podem aumentar a absorção dos herbicidas solúveis em água.

2.5 Fatores que afetam a absorção foliar

Além da tensão superficial da solução pulverizada e da lipofilicidade da solução, já discutidas, alguns pontos importantes que influenciam a absorção foliar de herbicidas são listados a seguir.

2.5.1 Retenção

A molhabilidade inerente da superfície foliar, determinada principalmente pela cerosidade, pela estrutura física característica da cutícula, e pela pilosidade (número de tricomas) da superfície foliar afeta a retenção do produto sobre a superfície foliar. Dever ser considerado também o intervalo de tempo entre a aplicação dos herbicidas e a ocorrência de chuvas após a pulverização.

2.5.2 Concentração da gota pulverizada

Em geral gotas menores e baixos volumes de aplicação (gotas concentradas) tendem a ser mais absorvidas que as gotas maiores em maior volume de aplicação (gotas diluídas). Considera-se que o motivo seria a maior

concentração por unidade de área foliar coberta pelo herbicida produzindo uma maior força motriz para difusão através da cutícula.

2.5.3 Fatores ambientais

A maioria dos estresses ambientais induz a uma mudança na composição e estrutura da cutícula, e estas mudanças podem influenciar a penetração dos herbicidas. Considera-se que podem afetar a absorção foliar os fatores ambientais que ocorrem imediatamente antes ou depois da aplicação. Aumento da intensidade luminosa e baixa umidade do solo tendem a induzir a síntese de cutícula, com um conseqüente aumento do caráter lipofílico da superfície foliar. A umidade relativa do ar tem também um papel importante na hidratação da cutícula e na redissolução de sais de herbicidas na superfície foliar. Por fim, o balanço entre a disponibilidade de água no solo e a umidade relativa do ar determina a intensidade de abertura dos estômatos, o que reconhecidamente pode afetar a absorção foliar.

3. Absorção Pelo Caule

O grau de penetração através do caule varia consideravelmente dependendo das características de crescimento e do estágio de desenvolvimento da planta.

Os herbicidas são prontamente absorvidos pelos tecidos jovens não diferenciados do caule, de modo semelhante ao que ocorre nas folhas. No entanto, comparado às folhas, o caule apresenta uma área disponível para absorção bastante limitada.

O movimento através da casca de plantas lenhosas é muito diferente. A periderme, tecido protetor que toma o lugar da epiderme depois que ela morre, é composta de felôgênio, súber e feloderme (Figura 5). O súber é composto por células altamente compactadas destituídas de espaços intercelulares e, quando maduras, desprovidas de protoplasma. Estas células contêm tanino e têm paredes altamente suberificadas. Outros constituintes que podem ser encontrados na periderme são ácidos graxos, lignina, celulose e terpenos. Em função de sua estrutura e composição, a periderme exibe uma baixa permeabilidade à água e às substâncias químicas aplicadas, especialmente aquelas de natureza polar.

Qualquer característica que facilite a penetração através da casca pode ser uma rota potencial de absorção. As lenticelas (Figura 5), por exemplo, são canais radiais que podem atravessar parcial ou totalmente a camada de súber, e são encontradas nos caules velhos e suberificados. São pequenos pontos de ruptura do tecido suberoso, que surgem após o crescimento secundário, que aparecem como orifícios na superfície do caule e fazem contato entre o ambiente e as células dos parênquimas interiores. As lenticelas apresentam função semelhante aos estômatos da epiderme, podendo atuar na troca gasosa ou na absorção via caule.

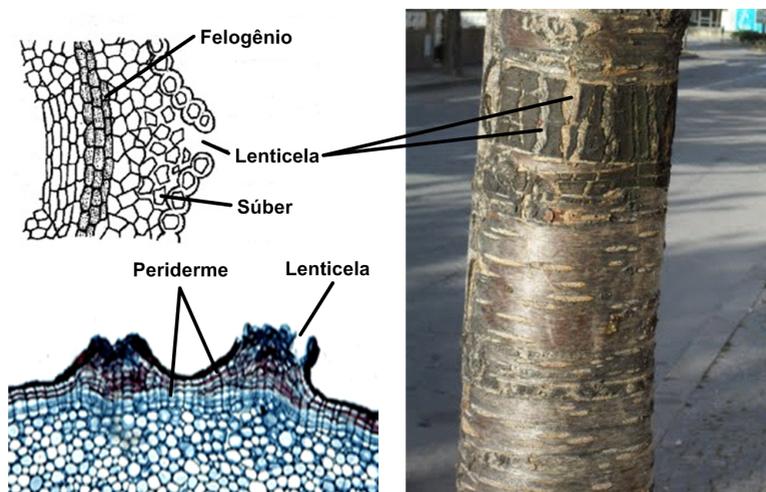


Figura 5. Acima à esquerda: resumo esquemático de uma lenticela. Fonte: Santos (2011). À direita: tronco de Cerejeira-do-Japão com lenticelas. Fonte: Reis (2011). Abaixo à esquerda: detalhe de lenticela do caule de *Sterculia* sp. Foto: Castro, N.M., Fonte: Castro (2011c).

Alguns dos conceitos mais importantes relacionados à absorção de herbicidas em caules de plantas lenhosas são amplamente utilizados no controle de plantas daninhas arbustivas ou arbóreas em pastagens ou ainda na eliminação de árvores adultas isoladas. Nestes casos, as aplicações foliares são muitas vezes inacessíveis ou de grande dificuldade, em função do porte da planta. Mesmo quando o porte não é limitante, nem sempre a adequada cobertura do dossel implica na translocação eficiente do herbicida para o sistema radicular, o que acaba por resultar em controle ineficiente ou em rebrota das plantas. As principais formas de aplicar herbicidas via caule são discutidas a seguir.

3.1 Aplicação basal sobre a casca

Este método envolve a mistura de um herbicida solúvel em óleo e posterior aplicação na circunferência do tronco ou caule da planta. A aplicação basal é adequada para espécies arbóreas com casca fina e árvores isoladas indeejadas. Toda a circunferência do tronco deve ser pulverizada ou pincelada do solo até uma altura de 30 cm. É importante saturar toda a circunferência e tratar todos os ramos ou caules que emergem do solo. É um método efetivo e uma boa maneira de abordar áreas de difícil acesso, tais como áreas íngremes. Este método normalmente controla plantas daninhas de difícil controle em qualquer época do ano, desde que a casca não esteja molhada ou muito grossa para o óleo penetrar (Figura 6).



Figura 6. Aplicação basal sobre a casca com mistura de óleo e herbicida.
Foto: BASF. Fonte: [Ferrel et al. \(2010\)](#).

3.2 Injeção no caule

A injeção no caule envolve a perfuração ou o corte através da casca até o albúrnio dos troncos das plantas invasoras lenhosas ou árvores. O albúrnio localiza-se na região externa do cilindro central, tratando-se da região mais jovem do caule onde existe xilema funcional, e se diferencia do cerne (região mais interna do cilindro central, com xilema inativo, e menos penetrável por líquidos).

É essencial a aplicação do herbicida imediatamente após a abertura do furo ou corte, uma vez que este tipo de aplicação depende da absorção ativa e do crescimento da planta para que o herbicida se transloque para as demais partes da planta.

Atualmente, existem métodos e ferramentas disponíveis para este tipo de controle. A injeção no tronco de árvores ou de plantas daninhas lenhosas com circunferência maior do que 5 cm pode ser feita, por exemplo, com a utilização de uma furadeira acoplada a um aplicador (Figura 7). A furadeira é utilizada para fazer perfurações anguladas para baixo no caule separadas entre si de aproximadamente 5 cm. A aplicação do herbicida é feita dentro do orifício é normalmente feita usando um reservatório costal e uma seringa que podem aplicar quantidades conhecidas da solução herbicida.

Outra possibilidade é usar um machado e cortar através da casca até o albúrnio e imediatamente colocar herbicida no corte. Os cortes podem

ser feitos em toda a circunferência do caule, mais ou menos na altura da cintura (0,9 – 1,0 m de altura do solo). Ainda no corte, o machado ou a ferramenta utilizada para o corte é inclinado para fora para proporcionar um um local para a aplicação e acúmulo do herbicida. Os cortes devem ser feitos deixando-se pelo menos 3 cm de distância entre eles. É importante não anelar inteiramente o tronco, porque isto diminui a absorção do herbicida na planta.

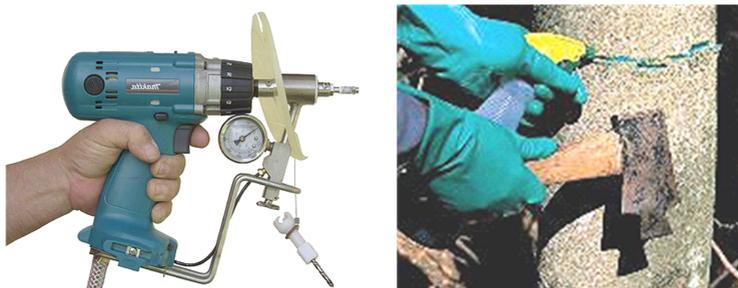


Figura 7. Dispositivo para perfuração e aplicação de herbicidas no caule de plantas lenhosas (à esquerda) e técnica de “corte e esguicho” no caule (à direita). Fotos: Sidewinder (Austrália) e Miller, J., U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service (EUA). Fontes: Sidewinder Pty Ltd (2011) e Ferrel et al. (2010).

3.3 Aplicação no toco

Neste método de aplicação, a planta é cortada completamente na sua base (no máximo a 15 cm de altura), utilizando um machado, motosserra, ou facão (dependendo da espessura do caule), rachando o toco sempre que possível. Deve-se encostar o bico do pulverizador rente ao toco e, com pressão mínima, aplicar a calda até o escorrimento. O herbicida deve ser misturado apenas em água, sem a adição de óleo ou espalhante adesivo. O corte dos tocos em plantas que já sofreram roçadas anteriores deverá ser feito abaixo da nova brotação. É fundamental que as soluções herbicidas sejam aplicadas logo que o tronco ou caule é cortado. A eficiência da translocação da solução para as raízes é inversamente proporcional ao tempo entre o corte e a aplicação. Portanto, quando as aplicações ou o pincelamento não é realizado imediatamente após o corte há maiores chances de rebrotas e, portanto, de falhas de controle. Normalmente esta operação requer pelo menos dois trabalhadores, e a aplicação do herbicida no toco pode ser realizada com um pulverizador costal ou pincel. Normalmente as formulações de herbicidas que destinam-se a este tipo de aplicação possuem corantes que facilitam a identificação dos tocos que já foram tratados. Para árvores de grande circunferência, é necessário aplicar a solução apenas em torno da borda do toco, uma vez que o objetivo é atingir a camada de câmbio

dentro da casca (Figura 8). Este método tem a vantagem de remover a planta daninha de imediato, sendo usado principalmente para as árvores e plantas daninhas lenhosas.



Figura 8. Aplicação de herbicidas em tocos de menor circunferência pode ser feita cobrindo toda a superfície exposta (esquerda), ao passo que em tocos de circunferência muito grande (direita) pode ser feita apenas no anel exterior do caule (direita). Fotos: Miller, J. U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, EUA. Fonte: [Ferrel et al. \(2010\)](#). Como alternativa, o toco pode ser perfurado ou partido, recebendo posteriormente a aplicação do herbicida (abaixo). Foto: Oliveira Jr., R.S.

4. Translocação de Herbicidas

4.1 Translocação a curta distância (da epiderme ao estelo) de herbicidas aplicados ao solo

Compostos como os inibidores de crescimento aplicados em pré-emergência precisam mover-se apenas poucas camadas de células para chegar ao seu sítio de ação. Este movimento pode acontecer pelo apoplasto ou pelo simplasto. O movimento de herbicidas nas paredes celulares pode ser por difusão com o fluxo de água. Uma vez dentro da célula, o movimento via simplasto dos herbicidas pode ser alcançado através de conexões citoplasmáticas (plasmodesmos). Embora o movimento através dos plasmodesmos não tenha sido provado especificamente para o caso dos herbicidas, já foi mostrado que vários outros solutos se movimentam desta forma ([Salisbury & Ross, 1990](#)).

É possível também que em alguns casos os herbicidas possam ser translocados diretamente para o interior do xilema e floema, quando penetram pelas extremidades de raízes, através de pelos radiculares, onde ainda não houve a diferenciação da endoderme.

4.2 Translocação a longa distância, das raízes para a parte aérea (xilema)

Assumindo que o herbicida não é imobilizado na folha ou raiz, ele estará disponível para movimento a longa distância na planta utilizando os sistemas vasculares (xilema e floema). Em ambos os casos, os herbicidas dissolvidos movem-se com o fluxo em massa da água, sendo importante, portanto, entender como este processo ocorre.

A força motriz do fluxo longitudinal de água no xilema é a diferença na pressão hidrostática, gerada a partir da “sucção” de água pelo parênquima foliar na direção do menor potencial de água no xilema conectado às partes aéreas, causado pela transpiração. A transpiração é influenciada por determinadas condições ambientais, dentre as quais a umidade relativa, que deve ser menor do que a umidade de saturação para que se inicie o processo. Alternativamente, em plantas de pequeno porte, sob alta umidade de solo e umidade relativa próxima à saturação, a água pode se mover como resultado da pressão radicular (Dan Hess, 1994b), o que poderá causar o fluxo dos herbicidas via xilema.

4.3 Translocação a longa distância, da parte aérea para o sistema radicular (floema)

A translocação via floema é um aspecto importante na atividade de muitos herbicidas. Aqueles aplicados às folhas podem alcançar as raízes, rizomas ou tubérculos de plantas perenes apenas se forem translocados pelo floema. Se a pulverização dos herbicidas não resultar na cobertura completa do dossel, a redistribuição a partir das folhas tratadas para outras partes da parte aérea (como meristemas apicais ou axilares) também pode ser importante (Devine & Hall, 1990).

A teoria aceita para o transporte pelo floema é a proposta por Münch, chamada de teoria do fluxo de pressão osmótica (Figura 9). Consiste basicamente na formação de um gradiente de concentração (potencial hídrico), decorrente do aumento da concentração de solutos na fonte (por síntese ou absorção) e da redução da concentração de solutos no dreno (por efluxo seguido por metabolismo ou compartimentalização). A alta concentração de solutos (dos quais mais de 90% constitui-se de sacarose) na fonte causa um influxo de água para dentro do floema, resultando num aumento da pressão de turgor (redução no potencial hídrico). A água, com os solutos nela dissolvidos, é “empurrada” através do floema por este aumento de pressão. Portanto, o fluxo depende da concentração de solutos no iní-

cio da rota (considerado geralmente como sendo no complexo de células companheiras/elementos crivados no dreno – Figura 10).

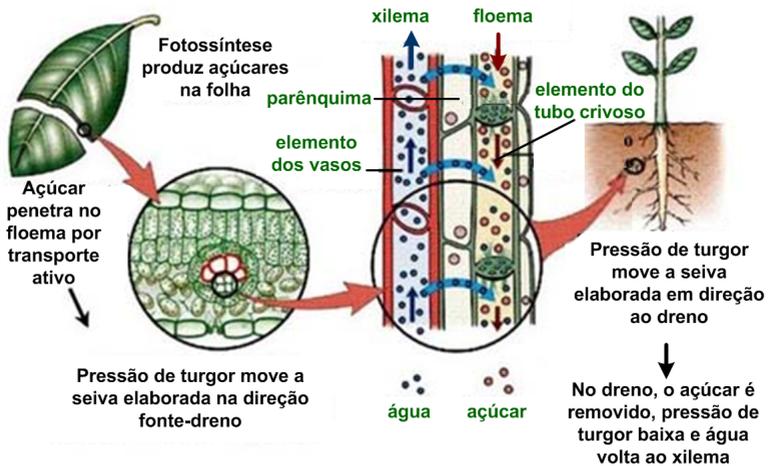


Figura 9. Resumo esquemático da teoria do fluxo em massa como explicação da translocação via floema. Fonte: modificado de Rocha (2011).

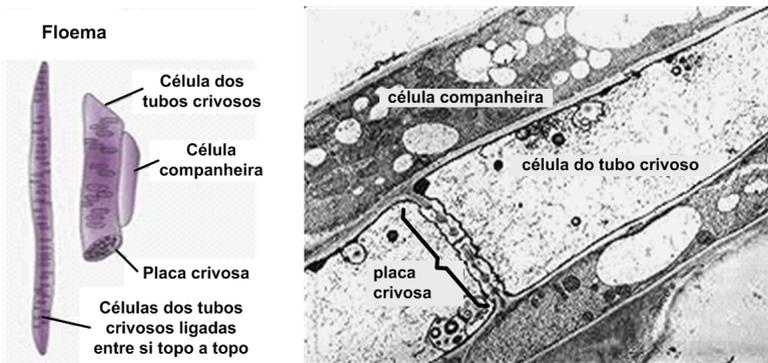


Figura 10. À esquerda: elementos que constituem o floema e corte longitudinal de uma angiosperma. Fonte: modificado de Encyclopædia Britannica (2011). À direita: foto de microscopia eletrônica mostrando os elementos dos tubos crivosos e as células companheiras. Fonte: modificado de Rocha (2011).

4.4 Características químicas das moléculas herbicidas que influenciam a translocação pelo floema

4.4.1 Lipofilicidade (K_{ow})

Lipofilicidade representa a afinidade de uma molécula ou de um grupo dentro de uma molécula por um ambiente lipofílico ou por solventes não polares. Uma vez que no xilema predomina substâncias hidrofílicas, ou seja, água e íons minerais dissolvidos, e que no floema predominam substâncias de maior caráter lipofílico, o transporte dos herbicidas depende da sua afinidade química por um dos sistemas de transporte.

A afinidade com a água é normalmente expressa pela solubilidade em água, ao passo que a afinidade por substâncias lipofílicas é normalmente estimada com base no comportamento de sua distribuição num sistema bifásico líquido-líquido, denominado coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}). Em alguns casos, quando o valor numérico de K_{ow} é muito alto, é possível encontrá-lo descrito como $\log K_{ow}$.

Herbicidas mais lipofílicos são absorvidos mais rapidamente, em função da maior afinidade com os constituintes estruturais de folhas, caule e raízes

Para os herbicidas polares, translocados via xilema, a corrente transpiratória correlaciona-se com o transporte destes para a parte aérea da planta, estabelecendo um gradiente de concentração entre a parte externa da raiz (solução do solo) e a interna da planta (corrente de assimilados). Alta temperatura e irradiância, baixa umidade relativa do ar, alta temperatura do solo e alto potencial de água no solo são condições que favorecem a transpiração e, conseqüentemente, a absorção e translocação destes herbicidas

4.4.2 Presença de grupos ionizáveis/potencial de ionização (pKa)

Alguns herbicidas podem mover-se através da membrana plasmática contra um gradiente de concentração, sendo que a maioria destes herbicidas tem um grupo ionizável (como, por exemplo, um grupo ácido carboxílico COOH) como parte integrante da molécula. Embora existam herbicidas que se dissociam como bases fracas (atrazine, por exemplo), a maior parte dos herbicidas se dissocia como ácidos fracos. Neste caso, abaixo de determinado pH, estes herbicidas apresentam predominantemente carga líquida zero, ao passo que acima deste pH predomina a forma aniônica. O pH no qual a dissociação é máxima (isto é, 50% da molécula está numa forma e 50% na outra forma) é denominado de pKa. O pKa depende do grupo químico que se dissocia na molécula do herbicida. Um exemplo típico de herbicida que se dissocia como ácido fraco é o 2,4-D.

O lado externo aquoso das células tem um pH mais baixo do que o lado interno. Esta diferença de pH é criada pela ação da bomba de íons de H^+ /ATPase. Dependendo do pKa do grupo ionizável do herbicida, um

equilíbrio será estabelecido entre a forma ionizada (mais solúvel em água) e a forma protonada (mais lipossolúvel) em cada lado da membrana.

Por causa da diferença de pH entre o lado interno e externo da célula, a forma protonada será mais abundante no lado interno. A forma protonada prontamente se difunde para o interior da célula, onde a forma ionizada (solúvel em água) tem dificuldade para se difundir para fora da célula.

Os herbicidas que possuem uma função ácida são transportados pelo floema, e foi sugerido que estes compostos poderiam penetrar no floema por intermédio de um carreador específico que reconhece um grupamento ácido carboxílico (Bromilow et al., 1990). Aparentemente, outras classes de compostos também podem penetrar rapidamente no simplasto (Peterson & Edgington, 1976), mas, apesar disto, poucos deles são efetivamente transportados no floema.

Tyree et al. (1979) desenvolveram o importante conceito de que muitos compostos são capazes de entrar no simplasto, mas apenas aqueles que possuem taxas de penetração limitadas poderiam ser retidos durante tempo suficiente para que o transporte à longa distância via floema pudesse ocorrer. Aqueles compostos que se movem livremente através das membranas rapidamente alcançariam um equilíbrio entre xilema e floema, e desta forma mover-se-iam predominantemente na direção do fluxo transpiratório, em função do fluxo de água muito maior (Figura 11).

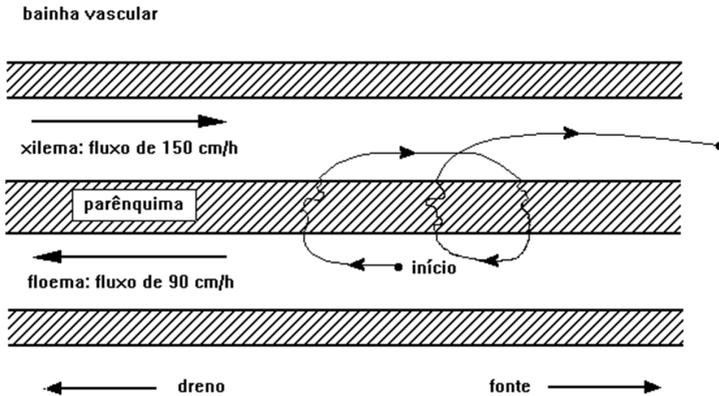


Figura 11. Diagrama mostrando porque herbicidas lipofílicos, não ionizáveis, não são capazes de se translocar efetivamente para longe da folha-fonte. Assumir que a bainha vascular está localizada no pecíolo foliar e que o herbicida permanece no xilema, floema e parênquima associado por dois minutos em cada um. Fonte: Dan Hess (1985).

4.4.3 Balanço entre ionização e lipofilicidade

Os herbicidas que apresentam maior facilidade de penetração na membrana celular são os compostos não ionizáveis que apresentam $\log K_{ow}$ de 0 a 3 (triazinas e uréias substituídas, por exemplo), os quais se movem principalmente pelo xilema. Compostos de maior lipofilicidade, como trifluralin, não são translocados devido à forte partição que sofrem no tecido vegetal.

Os herbicidas que apresentam capacidade de movimentar-se pelo floema são normalmente ácidos fracos, os quais também se movimentam via xilema, sendo que o balanço entre os dois sistemas vasculares é o que determina a sua distribuição. Os herbicidas paraquat e diquat, por exemplo, movimentam-se pelo floema, mas em função do rápido dano que causam ao tecido vegetal, seu transporte é muito limitado (Kogan & Pérez, 2003).

A maioria dos herbicidas que se movem pelo floema e que correspondem a ácidos fracos, apresentam valores de $\log K_{ow}$ entre 1 e 3, e valores de pK_a entre 2 e 4 para suas moléculas não dissociadas. No entanto, existem outros ácidos, como os ariloxifenoxipropionatos, que apresentam valores de $\log K_{ow}$ entre 3 e 4,5, os quais são mais lipofílicos e, portanto, apresentam mobilidade limitada no floema. Em geral, os compostos que apresentam alta polaridade ($\log K_{ow} < 0$) e forte ionização ($pK_a < 2$), como o glyphosate ($\log K_{ow} = -2,77$ a $-3,22$), são móveis pelo floema, embora quantidades importantes se movam pelo apoplasto (xilema). Na Figura 12 observa-se o tipo de mobilidade que um herbicida poderia apresentar levando-se em conta sua ionização (pK_a) e polaridade ($\log K_{ow}$).

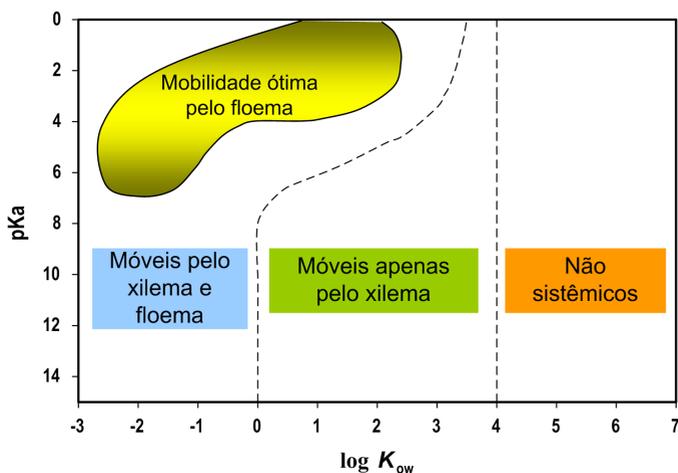


Figura 12. Relações entre dissociação e lipofilicidade requeridas para agrupar herbicidas quanto a sua capacidade de translocação nas plantas. Adaptado de Bromilow et al. (1990).

4.5 Padrões gerais de translocação de herbicidas

O balanço entre translocação pelo floema e pelo xilema determina o padrão de distribuição dos herbicidas.

Compostos de amônia quaternária podem ser translocados pelo floema, mas os herbicidas desta classe, tais como o paraquat, causam um dano tão rápido às folhas tratadas na presença de luz que o transporte é desprezível.

Em resumo poder-se concluir:

1. Os herbicidas diferem em relação aos seus padrões de translocação (Tabela 2). Estas diferenças podem ser atribuídas a diferenças físico-químicas entre herbicidas ou aos fatores fisiológicos diferenciais dos herbicidas nos tecidos.
2. Mesmo os herbicidas considerados como altamente móveis pelo floema exibem algum movimento no apoplasto (Figura 13).
3. A translocação de um herbicida específico pode variar entre espécies de plantas. Em alguns casos isto pode ser atribuído a diferenças no metabolismo do herbicida, resultando em espécies moleculares com diferentes propriedades físico-químicas. É possível que tais diferenças sejam devido a diferenças anatômicas ou fisiológicas entre espécies, particularmente em relação ao transporte pelo floema.

Tabela 2. Padrões de translocação de alguns herbicidas. Fonte: compilado de Dan Hess (1994c).

A) Quando aplicados nas folhas		
Móveis no xilema e floema	Móveis apenas no xilema	Pouco móveis ou imóveis
2,4 D	atrazine	diclofop-methyl
amitrole	diuron	diquat
glyphosate	metribuzin	lactofen
imazaquin	norflurazon	paraquat
picloram	propanil	
sulfometuron		

B) Quando aplicados no solo	
Móveis rapidamente no xilema	Pouco móveis ou imóveis no xilema
atrazine	DCPA
clomazone	orizalin
diuron	oxyflurofen
imazaquin	pendimethalin
metribuzin	trifluralin
picloram	
simazine	
terbacil	

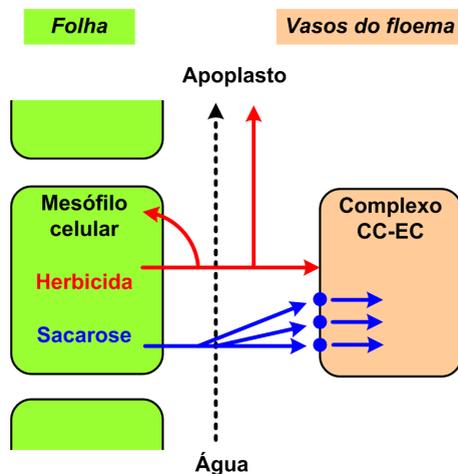


Figura 13. Diagrama mostrando a possível transferência de herbicidas e sacarose do simplasto através do apoplasto até o complexo de células companheiras/elementos crivados (CC-EC). Mostra-se que a sacarose se difunde a partir do mesófilo para o apoplasto de uma maneira similar ao herbicida, mas a presença de carreadores de sacarose nas membranas do complexo CC-EC favoreceria a rápida entrada de sacarose no floema. Consequentemente existe pouco movimento apoplástico de sacarose, mas maior translocação apoplástica de herbicidas. Fonte: adaptado de [Devine & Hall \(1990\)](#).

Referências

- Bittencourt Júnior, N., Morfologia vegetal. Morfologia e anatomia foliar em gimnospermas e angiospermas. Universidade Estadual de São Paulo. 2011. Disponível em <http://www.anatomiavegetal.ibilce.unesp.br/cursos/morfologiavegetal/aulas/folha1.php>. Consultada em 16/04/2011.
- Briskin, D.P., Membranes and transport systems in plants: an overview. *Weed Sci*, 42:255–262, 1994.
- Bromilow, R.B.; Chamberlain, K. & Evans, A.A., Physicochemical aspects of phloem translocation of herbicides. *Weed Sci*, 38:305–314, 1990.
- Castro, N., Sistema de revestimento – Epiderme. Universidade Federal de Uberlândia. 2011a. Disponível em <http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/exercicios.html/Epiderme.htm>. Consultada em 16/04/2011.
- Castro, N., Sistema de revestimento – Epiderme. Universidade Federal de Uberlândia. 2011b. Disponível em

- <http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/atlas/Epiderm.fig6.htm>. Consultada em 16/04/2011.
- Castro, N., Sistema de revestimento - Periderme. Universidade Federal de Uberlândia. 2011c. Disponível em <http://www.anatomiavegetal.ib.ufu.br/atlas/Perid.ilust.htm>. Consultada em 16/04/2011.
- Dan Hess, F., Herbicide absorption and translocation and their relationship to plant tolerance and susceptibility. In: Duke, S.O., (Ed.). *Herbicide physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. II, 1985. p. 191-214.
- Dan Hess, F., Absorption. In: *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: Purdue University, 1994a. p. 10-23.
- Dan Hess, F., Mechanism of action of inhibitors of amino acid biosynthesis. In: *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: Purdue University, 1994b. p. 344-365.
- Dan Hess, F., Translocation. In: *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: Purdue University, 1994c. p. 41-52.
- Dawson, J.H. & Appleby, A.P., Uptake of herbicides from soils by shoots. In: *Herbicide Action Course*. West Lafayette, EUA: Purdue University, 1994. p. 249-259.
- Deis, M.H. & Delrot, S., Carrier-mediated uptake of glyphosate in broad bean (*Vicia faba*) via a phosphate transporter. *Physiol Plantarum*, 87:569-575, 1993.
- Devine, M.D. & Hall, L.M., Implications of sucrose transport in membranes for the translocation of herbicides. *Weed Sci*, 38:299-304, 1990.
- DiTomaso, J.M.; Hart, J.J.; Linscott, D.L. & Kochian, L.V., Effect of inorganic cations and metabolic inhibitors on putrescine transport in roots of intact maize seedlings. *Plant Physiol*, 99:508-514, 1992.
- Donaldson, T.W.; Bayer, D.E. & Leonard, O.A., Absorption of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid and 3-(*p*-chlorophenyl)-1-1-dimethylurea (monuron) by barley roots. *Plant Physiol*, 52:638-645, 1973.
- Encyclopædia Britannica, , Angiosperm: xylem and phloem. 2011. Disponível em <http://www.britannica.com/EBchecked/media/379/Cells-of-the-xylem-and-phloem>. Consultada em 16/04/2011.
- Ferrel, J.A.; Langeland, K. & Sellers, B., Herbicide application techniques for woody plant control. IFAS extension SS-AGR-260, University of Florida, 2010. Disponível em: <http://edis.ifas.ufl.edu/pdffiles/AG/AG24500.pdf>. Consultada em 21/04/2011.
- Frans, R. & Cocks, M., The ecotree. 2011. Disponível em <http://www.botany.uwc.ac.za/ecotree/root/roota.htm>. Consultada em 05/08/2011.

- Hart, J.J.; DiTomaso, J.M.; Linscott, D.L. & Kochian, L.V., Transport interactions between paraquat and polyamines in roots of intact maize seedlings. *Plant Physiol*, 99:1400–1405, 1992.
- Hedrich, R. & Schroeder, J.I., The physiology of ion channels and electrogenic pumps in higher plants. *Ann Rev Plant Physiol*, 40:539–569, 1989.
- Knoche, M., Organosilicone surfactant performance in agricultural spray application: a review. *Weed Res*, 34:221–239, 1994.
- Kogan, M. & Pérez, A., *Herbicidas. Fundamentos fisiológicos y bioquímicos del modo de acción*. Santiago: Ediciones Universidad Católica de Chile, 2003. 333 p.
- Kolek, J. & Holobradá, M., Ion uptake and transport. In: Kolek, K. & Kozinka, V., (Eds.). *Physiology of the Plant Root System*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1992. p. 204–285.
- Luxová, M. & Champorová, M., Root structure. In: Kolek, K. & Kozinka, V., (Eds.). *Physiology of the Plant Root System*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1992. p. 31–81.
- McKenna, H., Anatomia da folha. 2011. Disponível em http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Anatomia_da_folha.svg. Consultada em 05/08/2011.
- Peterson, C.A. & Edgington, L.V., Entry of pesticides into the plant symplast as measured by their loss from ambient solution. *Pestic Sci*, 7:483–491, 1976.
- Price, T.P. & Balke, N.E., Characterization of rapid atrazine absorption by excised velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) roots. *Weed Sci*, 30:633–639, 1982.
- Reis, F., Plantas de chaves. Cerejeira-do-Japão (*Prunus serrulata* “kwanzan” LINDL). 2011. Disponível em <http://plantasdechaves.blogspot.com/2011/04/cerejeira-do-japao-prunus-x-serrulata.html>. Consultada em 16/04/2011.
- Rocha, S., Transporte em angiospérmicas. Rede Simbiótica de Biologia e Conservação da Natureza. 2011. Disponível em <http://curlygirl.no.sapo.pt/transpl.htm>. Consultada em 19/04/2011.
- Rodrigues, B.N. & Almeida, F.S., *Guia de Herbicidas*. 5a edição. Londrina, PR: Edição dos autores, 2005. 591 p.
- Rubery, P.H., The specificity of carrier-mediated auxin transport by suspension-cultured grown gall cells. *Planta*, 135:275, 1977.
- Salisbury, F.B. & Ross, C.W., *Plant Physiology*. Belmont, EUA: Wadsworth Publishing, 1990.

- Santos, A.R. & Souza, G.S., Nutrição mineral de plantas. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 2011. Disponível em http://www.ufrb.edu.br/nutricaoomineral//index.php?option=com_content&task=view&id=27&Itemid=33. Consultada em 19/04/2011.
- Santos, D., Órgãos de arejamento vegetal. 2011. Disponível em <http://djalmasantos.wordpress.com/2010/09/11/orgaos-de-arejamento-vegetal-4/>. Consultada em 12/03/2011.
- Sidewinder Pty Ltd, , Sidewinder patented drill/injector. 2011. Disponível em <http://www.treeinjectors.com/html/drillinjector.html>. Consultada em 21/04/2011.
- Sterling, T.M., Mechanisms of herbicide absorption across plant membranes and accumulation in plant cells. *Weed Sci*, 42:263–276, 1994.
- Taiz, L. & Zeiger, E., *Fisiologia vegetal*. 3a edição. Porto Alegre, RS: Artmed, 2004.
- Tyree, M.T.; Peterson, C.A. & Edgington, L.V., A simple theory regarding ambomobility of xenobiotics with special reference to the nematicide oxamy. *Plant Physiol*, 63:367–374, 1979.

Seletividade de Herbicidas para Culturas e Plantas Daninhas

Rubem Silvério de Oliveira Jr. e Miriam Hiroko Inoue

1. Introdução

A seletividade de herbicidas é a base para o sucesso do controle químico de plantas daninhas na produção agrícola, sendo considerada como uma medida da resposta diferencial de diversas espécies de plantas a um determinado herbicida. Uma vez que a base da seletividade aos herbicidas é o nível diferencial de tolerância das culturas e das plantas daninhas a um tratamento específico, a seletividade trata-se, portanto, de um fator **relativo**, e não **absoluto**. Quanto maior a diferença de tolerância entre a cultura e a planta daninha, maior a segurança de aplicação.

Alguns herbicidas, como os fenoxicarboxílicos, controlam preferencialmente plantas daninhas de folhas largas e não gramíneas, enquanto outros herbicidas, como as dinitroanilinas, controlam principalmente gramíneas. Herbicidas como o paraquat, controlam gramíneas e folhas largas anuais, mas não controlam plantas daninhas perenes. O efeito seletivo do herbicida é, portanto, uma manifestação das complexas interações entre uma planta, o herbicida e o ambiente no qual a planta se desenvolve.

Um herbicida seletivo é aquele que é muito mais tóxico para algumas plantas do que para outras dentro dos limites de: a) uma faixa específica de doses; b) método de aplicação e c) condições ambientais que precedem e sucedem a aplicação. Erros cometidos pelo usuário, tais como escolha imprópria do produto, época de aplicação, dose ou equipamento podem anular a diferença entre espécies tolerantes e susceptíveis e ambas podem ser injuriadas, ocasionando a perda da seletividade. A maneira pela qual a seletividade se expressa varia para cada combinação específica cultura-planta daninha e é normalmente bastante específico. Portanto, talvez o mais correto fosse julgar se determinado tratamento, e não um herbicida especificamente, é seletivo para determinada cultura. Por tratamento seletivo entende-se aquele que controla plantas indesejáveis (plantas daninhas) sem afetar seriamente aquelas que são de interesse (as culturas). A espécie que não sofre injúrias é considerada tolerante e a injuriada susceptível.

2. Fatores que Determinam a Seletividade

Embora se constitua da interação de diferentes fatores, para fins didáticos os principais aspectos relacionados à seletividade dos herbicidas para as plantas podem ser classificados em três categorias, descritas a seguir:

2.1 Fatores relacionados às características do herbicida ou ao método de aplicação

2.1.1 Dose

Quando a dose se refere ao produto comercial é normalmente expressa em unidades de massa ou de volume por unidade de área. Quando se refere ao princípio ativo, é, por convenção, expressa em unidades de massa por unidade de área, independente do tipo de formulação (líquida ou sólida). A dose de aplicação de um herbicida deve ser tal que as plantas daninhas sejam efetivamente controladas com pouco ou nenhum dano para as plantas cultivadas. Por exemplo, as triazinas foram inicialmente introduzidas como esterilizantes de solo não seletivos, usadas em doses de 20 a 40 kg ha⁻¹. Mais tarde, descobriu-se que elas poderiam ser usadas seletivamente em certas culturas como alfafa e algodão, quando aplicadas em doses entre 1 e 2 kg ha⁻¹.

Além disto, uma determinada dose pode ser seletiva para uma espécie e letal para outra. No caso do imazethapyr, por exemplo, a soja apresenta uma tolerância cerca de 20 vezes superior à do milho (Tabela 1).

Tabela 1. Comparação da atividade herbicida e taxa de metabolismo de imazethapyr em plantas de soja e milho. Fonte: [Shaner & Mallipudi \(1991\)](#).

Espécie	Dose segura* (g ha ⁻¹)	Meia-vida (horas)
Soja	>500	31
Milho	24	21

* Dose segura é considerada a dose mais alta que resulta em menos de 15% de injúria à cultura.

2.1.2 Formulação

A formulação de um herbicida é muito importante para determinar se este é ou não seletivo para uma determinada espécie. Talvez o exemplo mais claro disto seja a utilização de formulações sólidas (granuladas ou peletizadas), as quais permitem que, após a distribuição no campo, o herbicida não fique retido pelas folhas das culturas e entre em contato apenas com o solo. Outra aplicação para estas formulações são as aplicações localizadas em pastagens, as quais visam o controle de espécies arbustivas ou de infestações localizadas em reboleiras, minimizando a área de pastagem pulverizada.

Substâncias conhecidas como adjuvantes são geralmente adicionadas para melhorar as propriedades de formulações líquidas; estes aditivos podem aumentar ou diminuir a toxicidade do herbicida em questão. A adição de protetores às formulações também pode ser usada para aumentar a tolerância da cultura a um herbicida específico.

2.1.3 Localização espacial ou temporal do herbicida em relação a planta

- **Localização espacial do herbicida (seletividade de posição):**

A seletividade de herbicidas obtida pelo posicionamento físico é discutida aqui em referência a qualquer fator que resulte na separação espacial entre tecidos sensíveis da cultura e doses tóxicas dos herbicidas. A seletividade desejada é alcançada quando uma concentração tóxica do herbicida fica em contato com as plantas daninhas, mas evita-se tais concentrações para as culturas.

O posicionamento do herbicida no espaço pode atuar como um fator de seletividade, evitando-se, por exemplo, que o produto aplicado entre em contato com partes subterrâneas que poderiam absorver o produto. Isto pode acontecer quando herbicidas são aplicados na superfície do solo e não incorporados, incorporados de maneira rasa ou aplicados apenas na área entre as linhas das culturas.

Algumas culturas perenes não sofrem danos após a aplicação de herbicidas aplicados ao solo por possuírem raízes profundas, o que evita o contato direto com altas concentrações do herbicida.

Vários outros fatores além do método e do momento de aplicação em relação ao estágio de crescimento da cultura ou da planta daninha podem influenciar a seletividade de posição, incluindo a incorporação mecânica, irrigações, formulação do herbicida, propriedades químicas do herbicida e do solo. Restrições ao uso de herbicidas relacionadas a estes fatores muitas vezes podem ser encontradas nos rótulos dos produtos comerciais. Variáveis ambientais também interagem com fatores físicos afetando a seletividade de herbicidas, e condições externas (precipitação, temperatura) que afetem o movimento dos herbicidas ou alterem a resposta fisiológica das plantas podem reduzir a seletividade.

A seletividade de posição é um dos fatores mais importantes para os herbicidas do grupo das dinitroanilinas. Estes herbicidas são absorvidos principalmente pelas plântulas das gramíneas antes da emergência. Como a maioria das sementes das plantas daninhas encontra-se nos primeiros centímetros de profundidade do solo e tais herbicidas são muito pouco móveis no perfil, acabam por afetar apenas as plantas daninhas e não a cultura.

- **Seletividade de posição em aplicações em pós-emergência:** Com respeito à aplicação de herbicidas em pós-emergência, pode-se alcançar seletividade ao evitar-se que o herbicida entre em contato com a cultura em locais de absorção preferencial dos herbicidas, tais como folhas ou gemas, ao mesmo tempo fazendo-o entrar em contato com as plantas daninhas já emergidas. Isto é, geralmente, alcançado através do uso de aplicações dirigidas na base das plantas ou através de pulverizações com equipamentos de proteção acoplados a barra de pulverização.

Aplicações localizadas são, geralmente, feitas depois que as plantas da cultura já atingiram um tamanho tal que permitam uma pulverização dirigida abaixo do dossel foliar, evitando contato direto com as folhas e gemas axilares. Nesta fase, as plantas daninhas devem estar pequenas, de modo que possam ser inteiramente cobertas pelo jato aplicado. Aplicações dirigidas em culturas plantadas em linhas requerem a adequação do equipamento de aplicação, normalmente com a utilização de pingentes e pontas de pulverização especiais. A maior vantagem deste tipo de utilização é que ela possibilita o uso de herbicidas não seletivos (que geralmente são de menor custo em relação aos seletivos) nas culturas. Uma outra possível vantagem pode ser a redução da área a ser pulverizada, considerando que apenas a área entre linhas recebe aplicação.

Aplicações com proteção são geralmente usadas em culturas para as quais a aplicação dirigida anteriormente descrita não é adequada. Uma barreira física, normalmente montada na barra de aplicação, é usada para proteger a cultura da pulverização do herbicida. No entanto, plantas daninhas presentes nas linhas da cultura também não são alcançadas. Para reduzir a possibilidade de deriva durante a aplicação, pode-se usar baixas pressões e pontas que proporcionem gotas maiores durante a pulverização.

Diquat e paraquat, mesmo sendo herbicidas não seletivos, podem ser usados de forma seletiva, fazendo-se, por exemplo, a aplicação em jato dirigido localizado nas entrelinhas da cultura do milho. Além destes, outros herbicidas não seletivos como carfentrazone e MSMA são também utilizados em aplicações dirigidas às entrelinhas na cultura do algodão (Figura 1).

2.2 Fatores relacionados às características das plantas

A seletividade a herbicidas pode ser obtida por meio de diferenças fisiológicas e morfológicas entre espécies de plantas. Tais diferenças estão relacionadas com a entrada de herbicidas nas plantas e seu efeito subsequente após a entrada. Os fatores fisiológicos que influenciam a atividade e a se-



Figura 1. Pulverizações localizadas em jato dirigido às entrelinhas da espécie cultivada minimizam a exposição da cultura e maximizam a das plantas daninhas, podendo resultar no uso seletivo de um herbicida não seletivo. Foto: L.H. Kasuya – Kasuya Consultoria Agronômica.

letividade envolvem aspectos relacionados com a absorção, translocação, e metabolismo das plantas.

2.2.1 Seletividade associada à retenção e absorção diferencial

As características das folhas que influenciam na seletividade são basicamente aquelas que afetam a interceptação e a retenção do herbicida pulverizado tais como superfície e ângulo de inserção foliar, forma, número e arranjo do dossel. Lâminas foliares que formam ângulos de 45° ou maiores com o plano horizontal retêm menos calda pulverizada do que aquelas que são mais paralelas a este plano.

O número de folhas e o seu arranjo nas plantas afeta a penetração do herbicida pulverizado no dossel foliar. Dosséis abertos permitem uma maior penetração da pulverização e, portanto, molhamento mais completo da planta. Dosséis foliares mais densos tendem a interceptar o jato de pulverização, interferindo na penetração.

Especificamente com relação às gramíneas, algumas características morfológicas destas plantas dificultam ou reduzem a interceptação, absorção e translocação de herbicidas, fazendo com que poucas classes de herbicidas aplicados em pós-emergência sejam efetivos para o controle destas plantas. Estas características são:

- As folhas nascem em ângulos muito agudos e as gotículas dos herbicidas têm dificuldade de penetrar e de serem retidas pelo dossel. O efeito do ângulo foliar se torna mais pronunciado quando a superfície foliar também tem depósitos de ceras epicuticulares.

- Os pontos de crescimento das gramíneas são localizados na base das plantas, e durante a fase inicial de crescimento, muitas vezes abaixo da superfície do solo. É, portanto, difícil matar gramíneas com herbicidas de contato que não atingem estes pontos de crescimento.
- Presença de meristema intercalar (internós), sistema vascular difuso, pouco funcional e sistema radicular fasciculado, o que limita a capacidade dos herbicidas de se translocarem e atingirem os respectivos locais de atuação.

Alguns fatores que podem potencialmente afetar a retenção e a absorção de herbicidas pelas plantas são discutidos a seguir.

2.2.1.1 Idade das plantas

A idade da planta afeta a absorção do herbicida, sua translocação e atividade nas plantas. Plantas jovens são mais susceptíveis a herbicidas do que plantas mais velhas, principalmente porque as plantas jovens possuem mais tecidos meristemáticos. Os tecidos meristemáticos são o centro da atividade biológica das plantas. Consequentemente, espera-se que os herbicidas que afetam processos metabólicos sejam muito tóxicos para plantas que possuem uma grande quantidade de tecidos meristemáticos e tenham pouca ou nenhuma atividade em plantas mais velhas, nas quais passam a predominar tecidos diferenciados.

2.2.1.2 Cultivar

Cultivares de cebola implantadas por meio de semeadura direta diferem entre si na tolerância a herbicidas. A cultivar Baia Periforme é mais tolerante do que as cultivares Granex e Texas Grano, em função da maior cerosidade foliar que apresenta (Tabela 2). A cerosidade diminui a retenção da calda pulverizada nas folhas, reduzindo a quantidade absorvida e o efeito tóxico de herbicidas aplicados em pós-emergência.

Tabela 2. Matéria seca da parte aérea de plantas de cebola ($\text{g } (0,5 \text{ m})^{-1}$) obtida 62 dias após a semeadura, após a aplicação de oxyfluorfen 30 dias após a semeadura. Fonte: Oliveira Jr. et al. (1997).

Dose Oxyfluorfen (kg ha^{-1})	Cultivares		
	Baia periforme	Granex	Texas Grano
0,096	1,18	0,79*	0,24
0,192	0,77	0,52*	0,08*
0,288	1,09	0,40*	0,03*
Sem herbicida	1,09	1,17	0,47

Médias seguidas por * foram estatisticamente inferiores às respectivas testemunhas sem herbicida pelo teste de Dunnet ($p \leq 0,05$).

No caso do algodoeiro, há diferenças marcantes com relação a espécies e cultivares em relação ao estresse causado por herbicidas como o diuron. A base da tolerância diferencial ocorre devido às taxas de absorção e translocação. *Gossipium hirsutum*, cultivares Acala 4/42, Barac, IAC-17 e BR-1 são muito tolerantes, ao passo que *Gossipium barbadense*, cultivares BAR-XLI-1, Barakat e Rim-de-boi são muito susceptíveis (Beltrão & Azevêdo, 1994).

Um bom exemplo da diferença de tolerância entre híbridos de milho ocorre em relação ao nicosulfuron. Ao comparar cinco híbridos comerciais de milho submetidos à aplicação deste herbicida (Figura 2), observa-se que aos 7, 14 e 21 DAA somente o híbrido B 761 apresentou índices que variaram de 3 a 5 (médio a severo) na dose de 30 g ha⁻¹. Na dose de 60 g ha⁻¹ o efeito foi mais acentuado, sendo observados índices de fitointoxicação de 3 a 5 para os híbridos OC 705, B 761 e AG 7000 em todas as avaliações. No que se refere aos híbridos Penta e B 551, em qualquer uma das avaliações, observaram-se índices de fitointoxicação inferiores a 3 (médio).

Analisando-se os sintomas de fitointoxicação no decorrer das avaliações, na dose de 30 g ha⁻¹, os híbridos B 551, Ocepar 705 e AG 7000 apresentaram pequena recuperação nas avaliações realizadas aos 14 e 21 DAA, em relação aos 7 DAA. No entanto, para o híbrido Penta, os sintomas foram nulos em todas as avaliações, e o híbrido B 761 foi o único que mostrou avanço na fitointoxicação nas avaliações seguintes. Entretanto, quando os híbridos foram submetidos à dose de 60 g ha⁻¹, para os híbridos B 551, Ocepar 705 e AG 7000, os sintomas observados nas avaliações realizadas aos 14 e 21 DAA foram praticamente os mesmos da primeira avaliação, o que não aconteceu com o híbrido Penta, o qual mostrou tendência de recuperação. Contudo, de forma semelhante à que ocorreu para a dose de 30 g ha⁻¹, o híbrido B 761, na dose de 60 g ha⁻¹, apresentou sintomas mais marcantes de fitointoxicação nas avaliações seguintes, se comparadas à primeira avaliação (Figura 2).

Estes resultados indicam que a permanência ou desaparecimento dos sintomas de fitointoxicação dos híbridos pode estar relacionada ao maior ou menor grau de sensibilidade quando submetidos às doses estudadas. Tais diferenças podem inclusive afetar a produtividade de grãos da cultura (Tabela 3). Tais diferenças têm suscitado restrições na recomendação deste herbicida para alguns híbridos de milho, em função dos prejuízos que podem ser impostos à cultura.

2.2.1.3 Tamanho da semente ou estrutura de propagação vegetativa

Canteiros de alho plantados com bulbilhos pequenos apresentam uma tolerância muito menor a herbicidas aplicados em pré-emergência, tais como ametryn e oxyfluorfen, em relação à mesma variedade plantada com bulbilhos grandes. O aumento da sensibilidade da cultura parece estar ligada

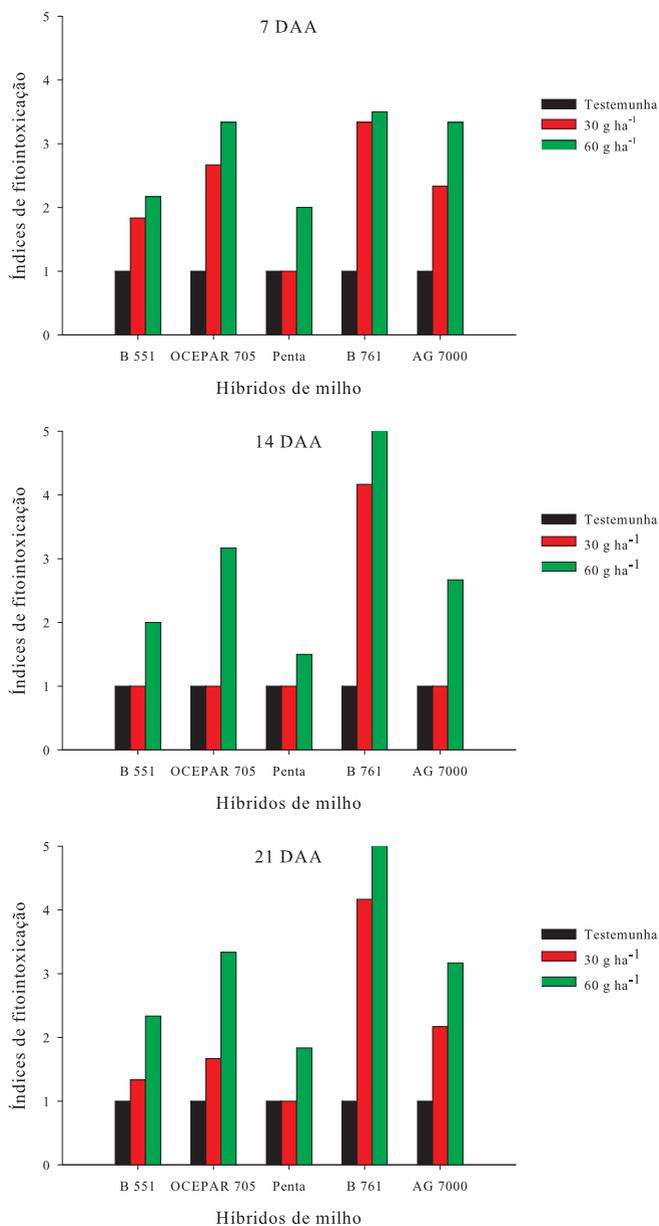


Figura 2. Índices de fitointoxicação, segundo escala EWRC modificada, em três épocas de avaliação, de híbridos de milho submetidos à aplicação do herbicida nicosulfuron em condições de campo. Fonte: [Cavaliere et al. \(2008\)](#).

Tabela 3. Produtividade de grãos (kg ha^{-1}) de milho por ocasião da colheita de híbridos submetidos à aplicação do herbicida nicosulfuron em condições de campo. Fonte: [Cavaliere et al. \(2008\)](#).

Híbrido	Dose nicosulfuron (g ha^{-1})					
	0		30		60	
B 551	5928	a	5587	a	5817	a
Ocepar 705	5156	a	5302	a	5230	a
Penta	6513	a	6765	a	6485	a
B 761	6319	a	5530	ab	5217	b
AG7000	6420	a	6402	a	6064	a
CV (%) = 11,05						
DMS = 904						

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

à menor quantidade de reservas presentes, o que proporciona menor capacidade de recuperação às plantas. De forma análoga, o tamanho das sementes e a profundidade na qual elas são depositadas no leito de plantio também podem afetar a seletividade de herbicidas para algumas culturas anuais.

2.2.2 Seletividade associada à translocação diferencial

Translocação é o movimento interno de água e substâncias dissolvidas de uma região para outra nas plantas. Após atravessar a camada cuticular, a maioria dos herbicidas precisa translocar-se no apoplasto ou no simplasto antes de chegar ao seu sítio de atuação.

Muito embora nenhum herbicida seja totalmente confinado ao simplasto ou ao apoplasto ([Devine, 1989](#); [Devine & Vanden Born, 1991](#)), a translocação à longa distância de muitos herbicidas ocorre predominantemente em apenas um dos sistemas. A rota primária da translocação de herbicidas depende de propriedades físico-químicas e das condições internas das plantas ([Devine, 1989](#)). Alguns herbicidas, por exemplo, podem sofrer ionização ao entrar no simplasto, resultando numa forma aniônica que é incapaz de voltar a atravessar a membrana celular. O herbicida na forma aniônica é “aprisionado” no citoplasma e fica confinado à translocação pelo simplasto. De forma análoga, herbicidas não iônicos que se movem livremente através da membrana celular podem sofrer transformações no apoplasto ([Hess, 1985](#); [Devine & Vanden Born, 1991](#)). A intensidade e a quantidade total translocada às vezes desempenham um papel determinante na seletividade entre plantas.

A translocação apoplástica diferencial após absorção radicular é um importante fator na determinação da seletividade de diversos herbicidas,

como o simazine (Shone & Wood, 1972) e o linuron (Walker & Feathers-tone, 1973). Em alguns casos, os herbicidas sofrem uma compartimentalização após a absorção e são imobilizados em radículas ou vasos capilares de espécies tolerantes, onde seu potencial de dano é minimizado.

No simplasto, a translocação de herbicidas pode ocorrer de forma bidirecional, e a direção do movimento final depende da localização das áreas de maior demanda de assimilados dentro da planta. A demanda e a oferta de assimilados é determinada pelo relacionamento entre locais de produção líquida de assimilados (“fontes”) e locais de utilização dos assimilados (“drenos”). A relação fonte-dreno determina a direção, taxa, e extensão do transporte de herbicidas que são móveis no floema e varia entre plantas daninhas, bem como para diferentes fases do ciclo de vida de uma mesma planta daninha.

A translocação diferencial tem um papel importante na determinação da seletividade de alguns herbicidas móveis no floema, como o dicamba (Quimby & Nalewaja, 1971), glyphosate (Gottrup et al., 1976), chlorsulfuron (Devine et al., 1990) e imazamethabenz (Shaner & Mallipudi, 1991). Assim como na translocação diferencial apoplástica de herbicidas, os mecanismos através dos quais espécies tolerantes compartimentalizam herbicidas móveis pelo floema não estão completamente esclarecidos. Em geral plantas que exibem tolerância a herbicidas móveis pelo floema por não transportá-los também possuem a habilidade de metabolizar o herbicida absorvido para uma forma inativa, evitando a fitointoxicação (Hess, 1985; Shimabukuro, 1985).

2.2.3 Seletividade associada ao metabolismo diferencial (destoxificação)

A atividade bioquímica das plantas afeta a quantidade de herbicida absorvido que chega ao sítio de atuação, que pode ser suficiente ou não para que a toxicidade seja manifestada.

O metabolismo diferencial é provavelmente o mais comum dos mecanismos que contribuem para a seletividade de herbicidas nas plantas. Uma planta capaz de tolerar um herbicida em função deste mecanismo é capaz de alterar ou degradar a estrutura química do herbicida por meio de reações que resultam em substâncias não tóxicas. Plantas que não possuem a habilidade de destoxificar um determinado herbicida são mortas enquanto as plantas tolerantes que possuem esta capacidade escapam (Akobundu, 1987).

A maior parte das enzimas de plantas que metabolizam herbicidas possui uma faixa relativamente ampla de especificidade que pode permitir a uma única espécie metabolizar e destoxificar um grande número de diferentes herbicidas (Hatzios & Penner, 1982).

As plantas apresentam grande variabilidade na sua capacidade de destoxificar os herbicidas. Geralmente, plantas resistentes a determinados

herbicidas ou grupos de herbicidas são capazes de destoxificar o herbicida rapidamente antes que ele possa exercer seu efeito tóxico sobre a planta. Alguns dos exemplos de culturas onde a seletividade é baseada na habilidade da planta em degradar o herbicida após a absorção são as triazinas em milho, sorgo e cana-de-açúcar; propanil, thiobencarb, molinate e oxadiazon em arroz; diphenamid em tomate e vernolate em amendoim.

Metabolismo diferencial de diclofop-metil é um dos fatores que ocorre para a seletividade entre trigo (tolerante) e aveia (susceptível). Após a absorção pelas plantas, o trigo possui a capacidade de metabolizar o diclofop-metil a subprodutos não tóxicos, através de uma reação irreversível de aril-hidroxilação, ao passo que a aveia é incapaz de destoxificar o herbicida (Anderson, 1996).

Hatzios (1991) classifica os herbicidas de acordo com sua capacidade de sofrer biotransformações nas plantas em três categorias:

1. **Herbicidas estáveis** são aqueles que não sofrem desativação nas plantas;
2. **Herbicidas metabolicamente desativados** são aqueles que podem sofrer reações de redução, oxidação, hidrólise e ou conjugação, as quais resultam em compostos não tóxicos.
3. **Herbicidas metabolicamente ativados** são herbicidas que, uma vez absorvidos pelas plantas sensíveis, sofrem transformações metabólicas que resultam no aumento da sua fitotoxicidade.

O glyphosate e o paraquat são exemplos de herbicidas estáveis que não são metabolizados nem mesmo em pequena intensidade pela maioria das plantas; esta característica não é surpreendente, uma vez que ambos são herbicidas reconhecidamente não seletivos (Shimabukuro, 1985).

Exemplos de herbicidas que são extremamente seletivos por sofrerem desativação metabólica são as sulfoniluréias (Carey et al., 1997) e as imidazolinonas (Shaner & Robson, 1985; Shaner & Mallipudi, 1991), para os quais diferenças na seletividade entre espécies tolerantes e sensíveis pode ser centenas de vezes diferente. No caso das sulfoniluréias, as espécies tolerantes conseguem rapidamente transformar os herbicidas em produtos inativos, enquanto o metabolismo é muito mais lento e em menor intensidade nas espécies sensíveis (Neighbors & Privalle, 1990; Obrigawitch et al., 1990). Para as imidazolinonas, os principais metabólitos formados nas plantas são muito menos tóxicos do que os compostos originais (Tabela 4).

O exemplo clássico de herbicida que sofre o efeito contrário (ativação metabólica) é o 2,4-DB. Plantas susceptíveis a este herbicida como o caruru convertem enzimaticamente o 2,4-DB (relativamente não tóxico) a 2,4-D (muito fitotóxico) através de um processo celular denominado beta-oxidação. Muitas folhas largas que possuem a enzima que catalisa esta reação são mortas pela aplicação deste herbicida (Akobundu, 1987). A

Tabela 4. Comparação da atividade herbicida do imazapyr e de seu principal metabólito nas plantas. Fonte: [Shaner & Mallipudi \(1991\)](#).

Composto	Dose mínima (g ha^{-1}) para controle de 85% da população de:	
	milho	soja
Imazapyr	8	40
AC 247,087 (metabólito)	63	1000

tolerância de diversas leguminosas ao 2,4-DB baseia-se na sua capacidade de desativação metabólica rápida antes que quantidades letais de 2,4-D possam se acumular ([Smith, 1979](#)).

As reações mais importantes que participam do processo de destoxificação de herbicidas nas plantas são relacionadas na Tabela 5.

Tabela 5. Reações metabólicas nas plantas e principais grupamentos químicos afetados. Fonte: [Zimdhal \(1993\)](#).

Reação química	Grupo químico afetado
Hidroxilação	triazinas, ácidos fenólicos
Oxidação	ácidos fenólicos
Descarboxilação	ácido benzóico e ácido picolínico
De(s)aminação	uréias, dinitroanilinas
Desulfonação	tiocarbamatos
Desalquilação	dinitroanilinas, triazinas
Hidrólise	carbamatos, sulfoniluréias
Conjugação com constituintes das plantas	derivados do ácido benzóico

A conjugação e o acúmulo de herbicidas em certas estruturas das plantas são também considerados processos importantes que conferem seletividade em certos casos. A conjugação com açúcares, aminoácidos e proteínas pode causar uma redução na mobilidade da molécula do herbicida e conseqüente aumento na tolerância dele por uma determinada espécie. O acúmulo pode ser exemplificado pela compartimentalização de simazine após absorção por plantas de algodoeiro. O herbicida é acumulado em glândulas presentes nos tecidos do caule do algodoeiro.

3. Protetores ou “Safeners”

A seletividade para alguns herbicidas pode ser alcançada através do uso de substâncias químicas que protegem as plantas contra a ação tóxica dos herbicidas.

Estas substâncias foram primeiramente chamadas de “antídotos” por Hoffman (1962), em analogia à palavra utilizada em farmacologia, onde o uso de antídotos no tratamento de envenenamentos é utilizado. Embora largamente adotado, o termo tem sido questionado. Estas substâncias podem também ser chamadas de antagonistas, “safeners”, modificadores ou contra-toxicantes. Por meio do uso de um protetor químico, uma espécie outrora susceptível pode se tornar tolerante a um determinado herbicida, sem que a ação tóxica do produto em relação às plantas daninhas seja prejudicada. Os protetores químicos são normalmente aplicados nas culturas na forma de tratamento de sementes.

Os protetores previnem, mas não revertem, eventuais danos que o herbicida possa causar à cultura. O desenvolvimento da tecnologia dos protetores é relativamente nova; até o presente, o sucesso comercial de protetores contra herbicidas tem se limitado a três grandes culturas da família das gramíneas: milho, sorgo e arroz (Tabela 6).

Os mecanismos de ação exatos através dos quais estas substâncias protegem as culturas ainda não foram completamente elucidados, mas as hipóteses de que os protetores induzem uma rápida metabolização do herbicida e ou interação com os herbicidas nos locais de atuação têm sido postuladas como sendo as mais prováveis. Alguns exemplos de protetores comerciais são encontrados na Tabela 6.

Tabela 6. Exemplos de substâncias utilizadas como protetores para herbicidas.

Protetor	Herbicida e cultura em que são usados
CGA-133205	Usado com tratamento de sementes de sorgo para prevenir danos de metolachlor
Dichlormid (R-25788)	Utilizado na forma de misturas formuladas comerciais Eradicane (EPTC+dichlormid), Sutam (butylate+dichlormid) e Vernam (vernonlate+dichlormid)
Fenclorim (CGA-123407)	Usado no Japão para proteger o arroz de pretilachlor.
Flurazole	Usado para proteger sorgo de alachlor e acetochlor.
MG-191 e PPG-1292	Usado para proteger milho contra os ditiocarbamatos e cloroacetamidas (EPTC e butylate)

4. Engenharia Genética Versus Seletividade nas Culturas: Culturas Transgênicas

As primeiras experiências de campo com plantas transgênicas foram feitas em 1986, nos Estados Unidos e na França. Até o meio da década de 90, 56 diferentes culturas foram testadas em 34 países com mais de 3500 experimentos em mais de 15 mil áreas. As culturas que envolveram mais testes foram soja, milho, tomate, batata, algodão e canola. As características inseridas foram principalmente resistências a herbicidas, qualidade do produto, resistências a vírus e insetos.

A transformação de plantas visando resistência a herbicidas apresenta uma alternativa para obtenção de seletividade. Por meio desta tecnologia, resistência a diferentes herbicidas já foi obtida em várias espécies cultivadas (Tabela 7).

Tabela 7. Transformação de plantas visando resistência a herbicidas.
Fonte: Brommonschenkel & Moreira (1997).

Grupo ou herbicida	Gene transformado	Fonte gene	MR*	Plantas transformadas
Sulfoniluréias	acetolactato sintase	plantas	1	canola, arroz, linho, algodão, tomate, beterraba açucareira, melão.
Imidazolinonas	acetolactato sintase	plantas	1	fumo
Glyphosate	enolpyruvoyl shikimate 5-phosphate synthase	bactérias, plantas	1	tomate, canola, soja
Asulam	dihydropterate synthase	bactérias	1	fumo
Atrazine	proteína "D1"	plantas	1	soja
Glufosinate	N-acetyl transferase	bactérias	2	milho, trigo, arroz, algodão, canola, batata, tomate, beterraba açucareira
Glufosinate	glutamina sintetase	plantas	3	fumo
Bromoxynil	nitrilase	bactérias	2	canola, algodão, batata, tomate

*MR= Mecanismo de Resistência: 1 = alvo bioquímico mutado;
2 = destoxificação; 3 = superprodução do alvo.

Resultados de experimentos a campo indicam que aparentemente a introdução do gene para resistência nas variedades não causa nenhum outro tipo de efeito negativo nas culturas, mas o cultivo e consumo de plantas transgênicas ainda provocam muita polêmica. Nos Estados Unidos e no Canadá, milho e soja transgênicos estão presentes desde 1995 e foram

assimilados sem problemas pelos consumidores. No entanto, reação bem diferente é observada na União Européia e no Japão, onde os produtos transgênicos são rejeitados.

No Brasil, uma proposta sobre o plantio e a comercialização de transgênicos foi aprovada pela comissão especial da Câmara Federal em março de 2002. Pela proposta, a liberação de produtos fica a cargo da Comissão Técnica Nacional de Biossegurança (CNTBio), e os alimentos para consumo humano ou animal deverão apresentar informações em seus rótulos sobre a presença de organismos geneticamente modificados (OGMs).

O interesse no desenvolvimento de cultivares tolerantes a herbicidas tem sido estimulado principalmente por três fatores (Radosevich et al., 1997): pela redução na taxa de descobrimento de novos herbicidas, pelos custos crescentes para o desenvolvimento de novos herbicidas e pelo desenvolvimento de novas técnicas em biotecnologia que aumentaram muito a facilidade no desenvolvimento destas cultivares.

Os vários benefícios potenciais que podem advir do desenvolvimento de cultivares tolerantes a herbicidas foram enumerados por Harrison Jr. (1992) e Dyer et al. (1993):

- Aumento na margem de segurança dos herbicidas, reduzindo as perdas devido às injúrias;
- Redução do risco de dano às culturas pelo efeito residual de herbicidas usados na cultura anterior;
- Introdução de novos herbicidas para uso em culturas anteriormente susceptíveis.

Os riscos ou preocupações relacionados ao desenvolvimento destes cultivares também têm sido discutidos (Harrison Jr., 1992; Dale, 1995; Darmency, 1996; Williamson, 1996), e, resumidamente, englobam os aspectos:

- Preocupação do público em geral com relação à liberação de organismos geneticamente modificados no ambiente;
- Potencial de uso mais intensivo de herbicidas;
- Mal uso de herbicidas, levando à contaminação de mananciais aquáticos ou outros problemas ambientais;
- Extinção de plantas daninhas que contém genes de valor potencial;
- Preocupação de que cultivares tolerantes a herbicidas possam se tornar problemas como plantas daninhas ou que a resistência possa ser transferida através de fluxo gênico para outras espécies;
- Descaracterização de variedades cultivadas.

No Brasil, após o grande aumento do número de variedades de soja resistentes a glyphosate, um exemplo de pesquisa em andamento é o desenvolvimento de clones transgênicos de cana-de-açúcar resistentes ao glyphosate e ao ataque de insetos, com a tecnologia Bt (*Bacillus thuringiensis*).

No mundo, a situação atual varia de acordo com a cultura em questão. No caso do milho, já são cultivados no centro-oeste norte-americano híbridos resistentes ao glyphosate, glufosinato, imidazolinonas e sethoxydim. Para a soja, já são comercializadas cultivares resistentes ao glyphosate e a sulfoniluréias (chlorimuron e thifensulfuron). Em breve, também deverão estar disponíveis no mercado cultivares resistentes ao glufosinato e ao dicamba. Desde 1997, cultivares de canola resistentes ao glufosinato e ao glyphosate já são comercializadas nos EUA e Canadá. No passado, também foram desenvolvidas variedades de canola tolerantes às triazinas. Entretanto, seu cultivo não foi bem aceito por produzir 20% a menos das cultivares comuns (Monquero, 2005). Atualmente, são comercializados em diversos países cultivares de algodão resistentes ao bromoxynil, ao glyphosate (James, 2011) e ao glufosinato. O herbicida bromoxynil apresenta controle eficiente de plantas daninhas dicotiledôneas de ciclo anual, que representam um grande problema na cultura do algodão. Já o glyphosate controla com grande eficiência dicotiledôneas e gramíneas de ciclo anual, além de algumas espécies perenes, embora seja necessário maior número de aplicações e em doses mais elevadas. Existem ainda cultivares de arroz que contêm o gene *bar* que confere resistência ao glufosinato de amônio, com excelente adequação ao manejo, controlando com sucesso o arroz vermelho (Lilje et al., 2003).

A soja continua sendo a cultura cuja área de plantio representa a maior parte da área cultivada com culturas transgênicas no mundo, ocupando cerca de 65,8 milhões de hectares ou 53% da área total de culturas transgênicas, seguida pelo milho (37,3 milhões de hectares ou 30%), algodão (15,5 milhões de hectares ou 12%) e canola (5,9 milhões de hectares ou 5% área global de cultivo de transgênicos) (Tabela 8). Embora a resistência a herbicidas não seja a única característica incorporada nas cultivares transgênicas, desde o lançamento das primeiras cultivares em 1996, esta tem sido a característica predominante nos transgênicos. Em 2008, as cultivares resistentes a herbicidas de soja, milho, algodão, canola e alfafa ocupavam 63% da área total cultivada com esta característica, ou cerca de 79 milhões de hectares (James, 2011). Uma forte tendência de mercado tem sido observada a partir de 2007, com a introdução de cultivares que possuem mais de uma característica de resistência.

Nos próximos anos, a maior parte das cultivares de soja, milho e algodão disporão de características (*trades*) de resistência a insetos e a outros herbicidas além do glyphosate, tais como 2,4-D, dicamba, inibidores da ALS e inibidores da PPO. Além disto, as empresas de sementes incorpora-

rão outras características de importância agrônômica como a tolerância à seca.

Tabela 8. Área global de culturas com biotecnologia por país (2008).

Colocação	País	Área cultivada (10 ⁶ ha)	Principais culturas transgênicas
1º	Estados Unidos	62,5	Soja, milho, algodão, canola, mamão, alfafa, beterraba açucareira
2º	Argentina	21,0	Soja, milho, algodão
3º	Brasil	15,8	Soja, milho, algodão
4º	Índia	7,6	Algodão
5º	Canadá	7,6	Canola, milho, soja, beterraba açucareira
6º	China	3,8	Algodão, tomate, álamo, petúnia, mamão, pimentão
7º	Paraguai	2,7	Soja
8º	África do Sul	1,8	Milho, soja, algodão
9º	Uruguai	0,7	Soja, milho
10º	Bolívia	0,6	Soja

Referências

- Akobundu, I.O., *Weed Science in the Tropics: principles and practices*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1987. 522 p.
- Anderson, W.P., *Weed Science*. 3a edição. St. Paul, EUA: West Publishing Co., 1996. 373 p.
- Beltrão, N.E.M. & Azevêdo, D.M.P., *Controle de plantas daninhas na cultura do algodoeiro*. Campina Grande, PB: EMBRAPA-CNPAlgodão, 1994. 154 p.
- Brommonschenkel, S.M. & Moreira, M.A., Biossegurança no uso de plantas transgênicas resistentes a herbicidas. In: *Palestras do 21º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Caxambu, MG: SBCPD, 1997. p. 13–16.
- Carey, J.B.; Penner, D. & Kells, J.J., Physiological basis for nicosulfuron and primisulfuron selectivity in five plant species. *Weed Sci*, 45:22–30, 1997.

- Cavaliere, S.D.; Oliveira Jr., R.S.; Constantin, J.; Biffe, D.F.; Rios, F.A. & Franchini, L.H.M., Tolerância de híbridos de milho ao herbicida nicosulfuron. *Planta Daninha*, 26:203–214, 2008.
- Dale, P.J., Research & development regulation and the field trialling of transgenic crops. *Trends Biotechnol*, 13:398–403, 1995.
- Darmency, H., Movement of resistance genes among plants. In: Brown, T.M., (Ed.). *Molecular genetics and evolution of pesticide resistance*. Washington, EUA: American Chemical Society, v. 645 de *ACS Symposium Series*, 1996. p. 2009–2220.
- Devine, M.D., Phloem translocation of herbicides. *Rev Weed Sci*, 4:191–213, 1989.
- Devine, M.D.; Bestman, H.D. & Vanden Born, W.H., Physiological basis for the different phloem mobilities of chlorsulfuron and clopyralid. *Weed Sci*, 38:1–9, 1990.
- Devine, M.D. & Vanden Born, W.H., Absorption and transport in plants. In: Grover, R. & Cessna, A.J., (Eds.). *Environmental Chemistry of Herbicides*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1991. p. 119–140.
- Dyer, W.E.; Hess, F.D.; Holt, J.S. & Duke, S.O., Potential benefits and risks of herbicide-resistant crops produced by biotechnology. In: Janick, J., (Ed.). *Horticultural Reviews*. New York, EUA: John Wiley & Sons, v. 15, 1993. p. 365–408.
- Gottrup, O.; O'Sullivan, P.A.; Schraa, R.J. & Vanden Born, W.H., Uptake, translocation, metabolism and selectivity of glyphosate in Canada thistle and leafy spurge. *Weed Res*, 16:197–201, 1976.
- Harrison Jr., H.F., Developing herbicide-tolerant crop cultivars: introduction. *Weed Technol*, 6:613–614, 1992.
- Hatzios, K.K., Biotransformations of herbicides in higher plants. In: Grover, R. & Cessna, A.J., (Eds.). *Environmental Chemistry of Herbicides*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1991. p. 141–185.
- Hatzios, K.K. & Penner, D., *Metabolism of herbicides in higher plants*. Minneapolis, EUA: Burgess Pub. Co., 1982. 142 p.
- Hess, F.D., Herbicide absorption and translocation and their relationship to plant tolerances and susceptibility. In: Duke, S.O., (Ed.). *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, v. 2, 1985. p. 191–214.
- Hoffman, O.L., Chemical seed treatments as herbicide antidotes. *Weed Sci*, 10:322–323, 1962.
- James, C.A., *Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops: 2008. The First Thirteen Years, 1996 to 2008*. Relatório Técnico, International Service for the Acquisition of Agribiotechnology Applications, Ithaca, EUA, 2011.

- Lilge, C.G.; Tillmann, M.A. & Villela, F.A., Identificação de sementes de arroz resistentes ao herbicida glufosinato de amônio. *Rev Bras Sementes*, 25:87-94, 2003.
- Monquero, P.A., Plantas transgênicas resistentes aos herbicidas: situação e perspectivas. *Bragantia*, 64:517-531, 2005.
- Neighbors, S. & Privalle, L.S., Metabolism of primisulfuron by barnyard grass. *Pestic Biochem Physiol*, 37:145-153, 1990.
- Obrigawitch, T.T.; Kenyon, W.H. & Kuratle, H., Effect of application timing on rhizome johnsongrass (*Sorghum halepense*) control with DPX-V9360. *Weed Sci*, 38:45-49, 1990.
- Oliveira Jr., R.S.; Silva, J.F.; Ferreira, L.R. & Reis, F.P., Sensibilidade de cultivares de cebola (*Allium cepa* L.) implantados por semeadura direta ao oxyfluorfen aplicado em diferentes estádios de desenvolvimento da planta. *Revista Ceres*, 44:1-16, 1997.
- Quimby, P.C. & Nalewaja, J.D., Selectivity of dicamba in wheat and wild buckwheat. *Weed Sci*, 19:598-601, 1971.
- Radosevich, S.; Holt, C. & Ghersa, C., *Weed ecology: implications for weed management*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1997. 589 p.
- Shaner, D.L. & Mallipudi, N.M., Mechanisms of selectivity of the imidazolinones. In: Shaner, D.L. & O'Connor, S.L., (Eds.). *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1991. p. 91-102.
- Shaner, D.L. & Robson, P.A., Absorption, translocation, and metabolism of AC 252,214 in soybean (*Glycine max*), common cocklebur (*Xanthium strumarium*) and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*). *Weed Sci*, 33:469-471, 1985.
- Shimabukuro, R.H., Detoxification of herbicides. In: Duke, S.O., (Ed.). *Weed Physiology*. Boca Raton, EUA: CRC Press, 1985. p. 215-240.
- Shone, M.G.T. & Wood, A.V., Factors responsible for the tolerance of blackcurrants to simazine. *Weed Sci*, 12:337-347, 1972.
- Smith, A.E., Metabolism of 2,4-D by white clover (*Trifolium repens*) cell suspension cultures. *Weed Sci*, 27:392-396, 1979.
- Walker, A. & Featherstone, R.M., Absorption and translocation of atrazine and linuron by plants with implications concerning linuron selectivity. *J Exp Bot*, 24:450-458, 1973.
- Williamson, M.K., Can the risk from transgenic crops be estimated? *Trends Biotechnol*, 14:449-450, 1996.
- Zimdhal, R.L., *Fundamentals of weed science*. San Diego, EUA: Academic Press, 1993. 450 p.

Comportamento dos Herbicidas no Ambiente

Maurílio Fernandes de Oliveira e Alexandre Magno Brighenti

1. Introdução

Nos últimos anos, o crescimento da população mundial tem forçado o aumento da produção de alimentos, por meio da abertura de novas fronteiras agrícolas e da intensificação do uso do solo, com a adoção de tecnologias como a utilização de fertilizantes, variedades melhoradas, plantios adensados, agroquímicos e, recentemente, a introdução de plantas transgênicas, dentre outras.

Um pacote tecnológico para a obtenção de elevadas produtividades das culturas necessita conter um componente de manejo adequado de plantas daninhas, o qual é realizado basicamente com a utilização de herbicidas, especialmente em grandes áreas. Isto se deve à incorporação de mais áreas para o cultivo e à escassez e alto custo da mão-de-obra no meio rural.

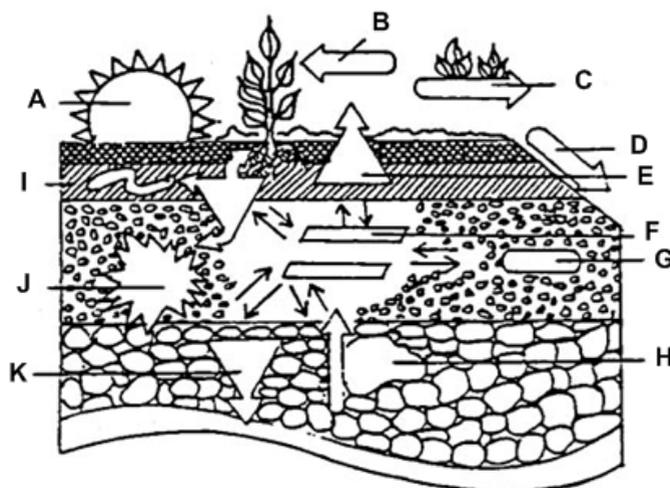
O solo é o destino final dos produtos químicos usados na agricultura, sejam eles aplicados diretamente no solo ou na parte aérea das plantas. Ao entrarem em contato com o solo, os herbicidas estão sujeitos a processos físico-químicos que regulam seu destino no ambiente. Exemplos destes processos são a retenção, a lixiviação, a volatilização, a fotodegradação, a decomposição química e microbiológica, o escoamento superficial e a absorção pelas plantas (Bailey & White, 1970) (Figura 1).

O complexo fenômeno de retenção, por meio dos processos de adsorção e dessorção, influencia direta ou indiretamente a magnitude dos efeitos dos outros fatores. A complexidade dos processos de retenção deve-se primariamente à heterogeneidade físico-química dos solos e suas interrelações com os sistemas biológicos, atmosféricos e aquáticos. Portanto, um requisito básico para entender os processos de retenção é conhecer a composição do solo.

Além da retenção, fatores bióticos e abióticos também podem interferir na atividade dos herbicidas sobre as plantas. O conhecimento destes fatores, assim como das características físico-químicas das moléculas, como solubilidade em água, pressão de vapor, coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}), constante de equilíbrio de ionização do ácido (pK_a) ou da base (pK_b) e da lei de Henry (H) e meia-vida ($t_{1/2}$), poderá direcionar as

ações dos técnicos e produtores no sentido de evitar que fatores ambientais reduzam a eficiência dos produtos.

Nos tópicos que se seguem, serão abordados alguns fatores edafoclimáticos, buscando caracterizar aspectos do solo que possam afetar a retenção dos herbicidas. Algumas propriedades físico-químicas das moléculas também serão discutidas, visando conhecer as características dos herbicidas que possam interferir na sua eficiência e no seu comportamento no ambiente. Após estas considerações iniciais, serão discutidas as interações entre os fatores edafoclimáticos e os herbicidas e os possíveis efeitos destes nas plantas.



- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| A: Fotodegradação | G: Degradação microbiológica |
| B: Decomposição pelas plantas | H: Fluxo capilar |
| C: Remoção pelas plantas | I: Absorção |
| D: "Runoff" | J: Degradação química |
| E: Volatilização | K: Lixiviação |
| F: Adsorção | |

Figura 1. Destino dos pesticidas aplicados na agricultura. Fonte: adaptado de [Appleby & Dawson \(1994\)](#).

2. Fatores Ambientais

O sistema solo é composto pelas fases sólida, líquida e gasosa. Os principais componentes do solo são: água, ar, materiais minerais e orgânico. A proporção relativa destes componentes afeta o comportamento do solo ([Brady](#)

& Weil, 1996), em vista das complexas variações temporais e espaciais nas proporções destes componentes no solo. As proporções aproximadas dos componentes sólido, líquido e gasoso, num solo de textura franca, são de 45% de material mineral, 5% de matéria orgânica, 25% do volume total constituído de água e 25% de ar.

No território brasileiro e em grande parte na América Latina, são predominantes os solos altamente intemperizados, como, por exemplo, os Latossolos e os Argissolos. Eles ocupam extensas áreas cultivadas e são, ainda, importantes como reservas naturais, com um papel proeminente na resolução dos problemas relacionados à produção de alimentos e à proteção ao meio ambiente. Pela sua formação e por influência de sua mineralogia, os solos altamente intemperizados e com carga variável apresentam propriedades agronomicamente desejáveis, como boa profundidade, estrutura estável, boa porosidade e alta permeabilidade. Por outro lado, eles também apresentam propriedades de alguma forma indesejáveis, como alta toxidez de Al, baixa reserva de nutrientes, baixa capacidade de troca catiônica, alta capacidade de adsorção aniônica (especificamente fosfato) e alto valor de pH_{PCZ} (pH no valor de Ponto de Carga Zero). A maioria destas propriedades está ligada direta ou indiretamente ao desenvolvimento e ao balanço de cargas elétricas na superfície das partículas que compõem seus sistemas coloidais (Fontes et al., 2001).

A fase sólida do solo é constituída pela matéria mineral e pela matéria orgânica. A fração mineral, por sua vez, é constituída de partículas de diferentes dimensões, originadas da intemperização dos materiais de origem. A parte orgânica é formada de restos de plantas e de animais em decomposição ou já decompostos. As frações orgânicas são submetidas a um contínuo processo de renovação, sendo, em geral, reduzidas após a introdução dos sistemas agrícolas.

A fase líquida do solo é composta pela mistura de água, sais minerais e moléculas de baixo peso molecular, como aminoácidos, peptídios, açúcares e substâncias húmicas nela dissolvidas. A esta mistura dá-se o nome de solução do solo. É na solução do solo que também se encontram as moléculas dos herbicidas, as quais estão sujeitas a inúmeras reações, segundo as propriedades da solução, como potencial hidrogeniônico (pH), força iônica e potencial redox (Eh). Portanto, se as moléculas possuírem propriedades físico-químicas que possam ser alteradas pelo meio (solução do solo), como, por exemplo, grupos ionizáveis, suas atividades sobre as plantas e seu destino no ambiente estarão na dependência das propriedades das soluções dos solos.

A matéria mineral inclui fragmentos de rocha, minerais primários e minerais secundários, todos em formas e dimensões extremamente variáveis. O exame destes componentes dos solos mostra a ampla variação no tamanho e na composição química das partículas (Tabela 1).

Tabela 1. Tamanho e área superficial de partículas do solo. Fonte: adaptado de EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1989).

Tipo de Partícula	Diâmetro (mm)	Número (g)	Área Superficial (cm ² g ⁻¹)
Cascalho	> 2,0	90	11
Areia grossa	2 – 0,2	3.200	34
Areia fina	0,2 – 0,05	384.000	159
Silte	0,05 – 0,002	5.780.000	454
Argila	< 0,002	9 x 10 ¹⁰	8 x 10 ⁶

A fração cascalho, também chamada de fragmentos de rocha, é constituída de pedaços grosseiros de material de origem, que aparecem como remanescentes da intemperização da rocha maciça, na formação do solo. Nas frações grossa e intermediária (areia e silte) do solo, os minerais individuais que aparecem provêm diretamente da rocha de origem, mantendo-se inalterados em sua composição, como, por exemplo: quartzo, feldspatos, micas, piroxênios e anfibólitos. Os componentes da fração argila dos solos são, na sua quase totalidade, minerais secundários, formados a temperaturas-ambiente, pela desintegração e alteração dos minerais primários por meio do intemperismo. Nos solos das regiões tropicais, os minerais secundários componentes da fração argila mais frequentes são os de argila silicatados e os oxidróxidos de ferro e alumínio, genericamente e, daqui por diante, chamados de “óxidos de Fe e Al”.

Os minerais de argila silicatados, também conhecidos como “minerais de argila”, são essencialmente silicatos de alumínio hidratados com Mg ou Fe, substituindo total ou parcialmente o Al, e podem apresentar elementos alcalinos ou alcalino-ferrosos na sua constituição. Os óxidos de Fe e Al são produto da insolubilização destes elementos e se apresentam como oxidróxidos, principalmente na forma cristalina.

Os principais minerais da fração argila são os silicatados, que apresentam o elemento silício (Si) na sua composição e pertencem ao grupo da caulinita: são os minerais chamados de 1:1. Caulinita é o principal e virtualmente o único mineral silicatado em quantidades expressivas (Fontes et al., 2001). A área superficial efetiva para trocas deste mineral fica restrita às suas faces exteriores. Os principais minerais secundários tipo 1:1 são a caulinita e a halosita.

A formação de cargas nos minerais 1:1 ocorre devido à substituição isomórfica ou a cargas dependentes de pH, que se desenvolvem nas bordas quebradas dos minerais, podendo ser negativas ou positivas. Na Tabela 2, são apresentados dados referentes à capacidade de troca e superfície específica dos principais constituintes dos solos com capacidade de adsorção.

Analisando a Tabela 2, verifica-se que a caulinita apresenta baixa superfície específica e capacidade de troca catiônica (CTC), sendo considerada, portanto, argila de baixa atividade.

De ocorrência mais comum em condições temperadas e, portanto, assumindo papel principal na geração de cargas nos solos destas regiões, os minerais do tipo 2:1 são formados por uma lâmina octaédrica intercalada em duas camadas tetraédricas. Nesses minerais, ligações iônicas dentro da estrutura mantêm as três lâminas juntas. Os principais grupos dos minerais secundários 2:1 são: esmectita (montmorilonita, beidelita, montronita, hectorita e saponita) e vermiculita.

Tabela 2. Algumas propriedades de constituintes do solo com capacidade de adsorção. Fonte: Bailey & White (1970).

Constituintes do Solo	Capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$)	Superfície específica ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$)
Matéria Orgânica	200 – 400	500 – 800
Vermiculita	100 – 150	600 – 800
Montmorilonita	80 – 150	600 – 800
Ilita	10 – 40	65 – 100
Clorita	10 – 40	25 – 40
Caulinita	3 – 15	7 – 30
Óxidos e Hidróxidos	2 – 6	100 – 800

A união das unidades 2:1 pode ser feita por forças de van der Waals, caso não haja substituição isomórfica. Se houver substituição isomórfica, as forças eletrostáticas entre o cátion, entre as camadas e a superfície de cada unidade mantêm as unidades 2:1 juntas. As unidades 2:1 são expansíveis, pois não apresentam as pontes de hidrogênio entre elas.

A formação de cargas nos minerais 2:1 se dá pela substituição isomórfica nas camadas tetraédricas ou octaédricas. É importante lembrar que também existem cargas dependentes de pH, mas estas estão presentes em menores proporções, quando comparadas às cargas provenientes da substituição, que geralmente não são mencionadas.

A montmorilonita, principal esmectita, tem suas cargas desenvolvidas a partir da substituição isomórfica, principalmente na lâmina octaédrica. Apresenta fraca atração dos cátions entre as camadas expansíveis e permite que a água, herbicidas e outras substâncias penetrem entre os planos basais e provoquem grande expansão do material. Em função da sua alta expansão, esse mineral apresenta alta superfície específica, a maioria devido a superfícies internas. A CTC deve-se praticamente a substituições isomórficas, sendo considerada argila de alta atividade.

A vermiculita é caracterizada pela considerável substituição do Si pelo Al na camada tetraédrica. Isto é a causa do abundante saldo de carga ne-

gativa que se acha associada a esse mineral. Moléculas de água, assim como íons de Mg, são fortemente adsorvidos entre as unidades cristalográficas. Entretanto, agem mais como pontes, mais mantendo juntas as unidades do que separando-as. Portanto, o grau de expansão é consideravelmente menor. A vermiculita também é argila de alta atividade, com CTC maior que da montmorilonita, devido a maior densidade de cargas. Apresenta superfície específica semelhante à da montmorilonita.

A caulinita apresenta ligação das unidades por pontes hidrogeniônicas, o que limita ao mineral a possibilidade de expandir-se e expor suas superfícies internas. Com isto, o mineral tem capacidade de reagir e apresentar cargas apenas nas faces externas e nas bordas quebradas (Fontes et al., 2001). Trabalhos citados por esses autores descrevem que 50% ou mais das cargas negativas da caulinita podem ser consequência de deprotonação de oxigênio e hidroxilas terminais a altos valores de pH ($\text{pH} \approx 7,0$). Se não existe substituição isomórfica de cátions vizinhos para criar déficit de carga positiva, a cavidade siloxana funciona como um fraco doador de elétrons, que atrai somente moléculas dipolares neutras, como, por exemplo, a água. Por outro lado, se existe substituição isomórfica e excesso de carga negativa, torna-se possível a formação de complexos tanto com cátions trocáveis quanto com moléculas dipolares, principalmente se a substituição ocorre na camada tetraedral.

Os óxidos de ferro e alumínio, característicos de regiões muito intemperizadas, como as tropicais, são importantes na fração argila dos solos brasileiros, apresentando influência significativa nas propriedades destes solos. Os principais óxidos de ferro são a hematita (não hidratado) e a goethita (hidratado). A gibbsita é o principal óxido de alumínio.

Os óxidos de Fe e Al apresentam cargas positivas ou negativas, de acordo com o pH (carga dependente de pH). O mecanismo de formação de cargas na superfície dos óxidos de Fe e Al pode ser visto como uma protonação ou deprotonação dos grupamentos situados na parte mais superficial das partículas. Assim, a natureza e a densidade de cargas, medidas pelo excesso ou déficit de prótons na superfície do colóide, se modificam com o pH. Existe um valor de pH em que a quantidade de prótons adsorvidos gerando carga positiva é igual ao número de oxidrilas gerando cargas negativas, resultando em carga líquida superficial igual a zero. Esse valor de pH recebe a denominação de Ponto de Carga Zero (pH_{PCZ}), sendo específico para cada tipo de óxido de Fe e Al (Fontes et al., 2001). Por outro lado, alguns autores (Alves & Lavorenti, 2005; Silva et al., 1996) descrevem o Ponto de Efeito Salino Nulo (PESN), que representa um valor de pH em que a concentração salina da solução, numa suspensão solo:solução, não tem efeito na carga da superfície das partículas do solo.

O material orgânico do solo, normalmente estimado por meio do teor de carbono orgânico (CO), inclui raízes de plantas, resíduos de animais e

plantas e biomassa microbiana, fresca e em diferentes estádios de decomposição. A composição química da matéria orgânica do solo é bastante complexa, compreendendo 5 a 50% de carboidratos, 10 a 30% de lignina, 10 a 20% de proteínas e peptídeos e cerca de 5% de fração solúvel em álcool ou éter (gorduras, óleos, graxas e pigmentos) (Santos & Camargo, 1999). A matéria orgânica restante é estruturalmente complexa e de proporções variáveis, sendo denominada genericamente de húmus. Verifica-se, assim, uma variação quantitativa e qualitativa entre o material orgânico de origem e a matéria orgânica do solo. O material humificado (húmus) é o produto mais estável das transformações do carbono no solo, sendo o componente ativo da matéria orgânica constituído da mistura de compostos polifenólicos (fenol é um anel benzeno com grupo -OH no carbono 1). Em pontos do anel benzeno, podem estar ligados grupos - COOH, - OCH₃, - CHO, - OH, bem como alguns grupos aminas e amidas. São nesses grupamentos que ocorre a maioria das reações de troca nos solos (Figura 2).

As vantagens inerentes à presença da matéria orgânica no solo são muitas. A matéria orgânica tem um efeito direto e indireto na disponibilidade de nutrientes para o crescimento das plantas. Em solos ricos em matéria orgânica, devido à maior densidade populacional de microrganismos, há maior mineralização de nutrientes, especialmente N, P e S. A presença de substratos orgânicos oxidáveis pode propiciar as condições para a fixação biológica do nitrogênio. A presença de matéria orgânica aumenta a capacidade tampicante e a CTC do solo. Devido à baixa CTC dos minerais de argila dos solos tropicais, a matéria orgânica, mesmo quando presente em pequenas proporções, apresenta grande efeito sobre as propriedades físico-químicas do solo. Segundo Santos & Camargo (1999), em solos tropicais e subtropicais, a CTC da matéria orgânica pode representar um grande percentual da CTC total do solo. Além disto, a matéria orgânica afeta a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, fundamentais em solos tropicais, na sua maioria altamente intemperizados e ácidos. A principal característica física do solo afetado pela matéria orgânica é a agregação. A partir do seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente são afetadas as demais características físicas do solo, como a densidade, a porosidade, a aeração, a capacidade de retenção e a infiltração de água, entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo.

As substâncias húmicas são macromoléculas de caráter complexo, devido a sua heterogeneidade e propriedades dependente de diferentes fatores, como: material de origem, aspectos climáticos (umidade e temperatura), microrganismos presentes no solo.

O húmus é material muito amorfo, que assemelha-se à lignina (complexo de polímeros aromáticos), apresentando alta superfície específica e alta carga negativa dependente de pH (Tabela 2). Apresenta-se carregado com grupos funcionais expostos a interações hidrofílicas e também com estruturas do tipo anel aromático, que favorecem interações hidrofóbicas.

Estudos recentes com a estrutura tridimensional dos ácidos húmicos têm demonstrado a existência de espaços vazios de diferentes tamanhos, onde poderiam alojar-se outros compostos orgânicos, hidrofílicos ou hidrofóbicos, como carboidratos e materiais proteináceos, lipídios, herbicidas e outros poluentes. Nesses espaços, ainda poderiam estar presentes elementos inorgânicos, como argilas e óxidos (Santos & Camargo, 1999). Os trabalhos de Martin-Neto, discutidos por Lavorenti et al. (2003), descrevem as mudanças conformacionais das substâncias húmicas com a alteração do pH. Para esses autores, em menores valores de pH, as substâncias húmicas apresentam-se mais globulares, o que favorece a criação de sítios hidrofóbicos e, com isto, pode aumentar sua interação com o herbicida. Devido a sua natureza, entende-se porque são encontrados altos níveis de correlação entre os teores de matéria orgânica nos solos e a adsorção de moléculas orgânicas (ex., herbicidas, especialmente os não-iônicos). Desta forma, o teor de matéria orgânica apresenta-se como o primeiro fator a ser considerado quando objetiva-se estudar a adsorção de herbicidas no solo (Don Wauchope et al., 2002).

Há grande variação entre os diversos tipos de solos com relação aos teores de matéria orgânica. Normalmente, os solos brasileiros apresentam teor de matéria orgânica na faixa de 1 a 4 %, sendo caracterizados como solos minerais. Apesar do teor aparentemente pequeno, a matéria orgânica apresenta grande influência nas propriedades físico-químicas dos solos, devido aos minerais de argila predominantes nos solos tropicais serem de baixa atividade. Os solos localizados nas baixadas ou várzeas podem apresentar altos teores de matéria orgânica, muitas vezes superiores a 20%, sendo identificados como orgânicos.

No meio aquoso, as argilas, juntamente com a matéria orgânica, tendem a formar soluções coloidais, cujas principais propriedades são grande superfície específica com alta atividade química, grande capacidade de retenção e trocas iônicas, interferência nos sistemas catalíticos, principalmente enzimáticos, acelerando ou diminuindo a velocidade de reações.

As partículas minerais e orgânicas unem-se entre si, formando os agregados e torrões. Dependendo da maneira como eles são arranjados espacialmente, o solo adquire uma determinada estrutura. Um solo é considerado bem estruturado quando consegue reter água suficiente para prevenir deficiência de umidade na região em torno do sistema radicular das plantas durante períodos secos e, por outro lado, permitir um escoamento suficiente para prevenir alagamento durante períodos de chuva. Além disto, a estrutura do solo guarda estreita relação com a sua porosidade, a qual deve permitir uma troca gasosa com a atmosfera e reduzir as chances de desenvolvimento de sítios anaeróbios.

A grande extensão territorial do Brasil é caracterizada pela presença de solos de diferentes classes, que apresentam variações em suas propriedades físicas e químicas. Em geral, os solos com B latossólico ou Latossolos são

mais profundos e porosos, apresentam maior resistência à erosão, maior lixiviação, menor fertilidade e menor atividade da fração argila do que os solos com B incipiente (Litossolos e Aluviais). Os solos com B textural (Podzólicos e Nitossolo Vermelho) apresentam características intermediárias entre os grupos citados acima (Resende, 1990). Propriedades físicas e químicas dos solos, no campo, estão sujeitas tanto à variação espacial quanto temporal, o que torna os estudos com solos específicos para o local e a época em que são conduzidos.

Além da variação entre solos, as propriedades físicas, químicas e biológicas no mesmo solo podem se alterar com a profundidade. Estas mudanças ao longo do perfil caracterizam alterações na estrutura do solo, na sua capacidade de retenção de umidade e na atividade microbiológica, entre outras. A variação das propriedades do solo com a profundidade afeta a retenção e a degradação dos herbicidas, que, junto com o movimento da água no perfil, determinam o potencial de contaminação de águas subterrâneas.

Oliveira (1998), estudando a retenção dos herbicidas imazaquin e flazasulfuron no perfil de um Latossolo Vermelho-Escuro, textura argila, até 1,20 m, verificou aumento da adsorção com a profundidade para o imazaquin e redução da adsorção do flazasulfuron. Por outro lado, a taxa de degradação do chlorsulfuron e do metsulfuron-metil reduziu-se com a profundidade do solo (Walker, 1987). Segundo este autor, as camadas de solos mais profundas apresentam menor atividade biológica e maiores valores de pH que as camadas superficiais.

3. Propriedades Físico-Químicas dos Herbicidas

Atualmente, a grande maioria dos herbicidas utilizados são moléculas orgânicas obtidas por rotas sintéticas, portanto, não são encontradas na natureza.

Recentemente, pesquisas com novas estratégias de descoberta de herbicidas buscam produtos seletivos com maior eficiência e menor risco de danos ao ambiente. Estas incluem a utilização de produtos naturais obtidos de plantas e microrganismos, como por exemplo, os pequenos peptídeos.

Ao descobrirem moléculas, artificiais ou naturais, com atividade herbicida, os pesquisadores trabalham em sua estrutura básica, fazendo substituições nos grupos funcionais, para aumentar a atividade do princípio ativo sobre as plantas (Devine et al., 1993). Por isto, é comum encontrar vários herbicidas com estrutura básica semelhante. Apesar da grande semelhança estrutural entre os componentes de um mesmo grupo químico e modo de ação, a seletividade para as plantas é bastante variável, e cada herbicida apresenta espectro de ação definido e específico. Além disto, cada herbicida, em virtude dos átomos que o compõem, seu número e da maneira como eles são arranjados na estrutura química, possui uma série específica de propriedades físico-químicas. Herbicidas pertencentes ao grupo das

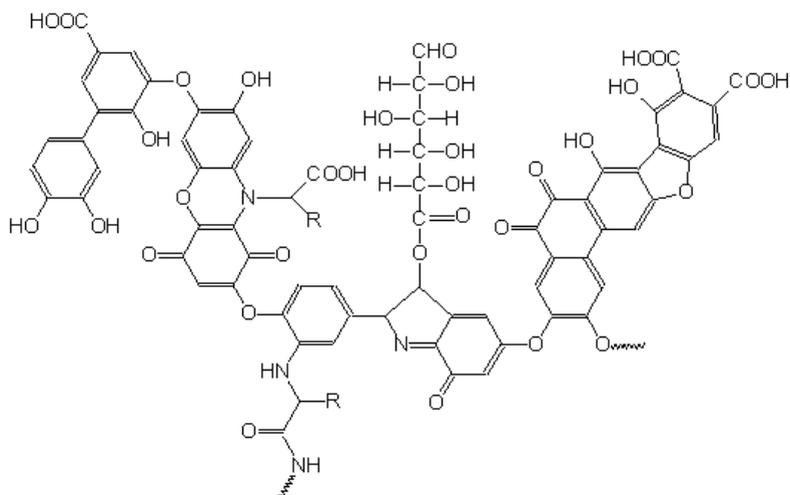


Figura 2. Estrutura hipotética do ácido húmico. Fonte: Santos & Camargo (1999).

sulfoniluréias ou das imidazolinonas, por exemplo, além do mesmo sítio de ação, apresentam características físico-químicas semelhantes, como estrutura química, valores da constante de equilíbrio de ionização próximos, especiação, hidrólise em água, entre outras.

O conhecimento das principais propriedades físico-químicas das moléculas de herbicidas é muito utilizado no estudo do seu comportamento no ambiente, o que permite uso mais racional dos mesmos. As principais propriedades físico-químicas do herbicida relacionadas com o seu comportamento são: solubilidade em água (S), pressão de vapor (P), coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}), constante de equilíbrio de ionização ácido (pK_a) ou base (pK_b), constante da lei de Henry (H) e meia-vida ($t_{1/2}$).

3.1 Constante de equilíbrio de ionização do ácido ou da base

Esta constante relaciona-se com a possibilidade de ionização das moléculas em soluções com diferentes valores de pH. As formas ionizadas de herbicidas se comportam diferentemente das não-ionizadas (neutras). Conforme a constante de equilíbrio de ionização, os herbicidas podem ser classificados em:

- **Herbicidas ácidos:** são aqueles cujas formas moleculares (neutras) são capazes de doar um próton e formar íons carregados negativamente. Quanto maior for o valor do pK_a do herbicida, mais fraca é

a sua força ácida; logo, menor a chance de o herbicida ficar aniônico. Para esses herbicidas, se o pH da solução do solo for igual ao pK_a do herbicida, as concentrações das formas não-dissociada (molecular) e dissociada (ionizada, nesse caso, aniônica) são iguais. Se o pH da solução do solo for menor que o pK_a do herbicida, a concentração da forma não-dissociada será maior que a da forma dissociada ou aniônica. O herbicida, ficando na forma original (neutra), terá comportamento semelhante às substâncias não-iônicas. Por outro lado, se o pH da solução do solo for maior que o pK_a do herbicida, a concentração da forma não-dissociada (molecular) será menor que a da forma aniônica. Isto ocorre principalmente com uma ou mais unidades de pH acima do valor do pK_a do herbicida ácido. O herbicida, ficando na forma aniônica, terá mais chances de ser transportado livremente através da solução do solo, a não ser que ele forme reações de complexação. Os herbicidas pertencentes aos grupos das imidazolinonas e das sulfoniluréias, comportam-se como ácidos fracos em solução.

- **Herbicidas básicos:** são aqueles cujas formas neutras (moleculares) são capazes de receber prótons e formar íons carregados positivamente. Uma vez que é comum encontrarmos valores de pK_a indistintamente para herbicidas ácidos ou básicos, deve-se considerar que a espécie química protonada é um ácido conjugado do herbicida básico. Por isto, será usada a mesma notação (pK_a) para os herbicidas básicos, para os quais, quanto maior for o valor de pK_b do herbicida (ou menor valor de pK_a) mais fraca é a sua força básica, isto é, menor a chance de o herbicida ficar catiônico. Se o pH da solução for igual ao pK_a do herbicida, as concentrações das formas não-dissociada (molecular ou neutra) e associada (catiônica ou protonada) são iguais. Por outro lado, se o pH da solução do solo for menor que o pK_a do herbicida, a concentração da forma catiônica (protonada) será maior do que a da forma neutra. Isto ocorre principalmente com uma ou mais unidades de pH abaixo do valor do pK_a do herbicida básico. Nestas condições, o herbicida tem grandes probabilidades de ficar adsorvido aos componentes do solo e não ser transportado para outras partes do ambiente. Mas, se o pH da solução for maior que o pK_a do herbicida básico, a concentração da forma neutra será maior que a da forma protonada ou catiônica. Os herbicidas paraquat e diquat (derivados da amônia quartenária) comportam-se como base forte em solução, apresentando-se com carga positiva em solução. São fortemente adsorvidos quando em contato com o solo, com praticamente nenhuma dessorção. Já os herbicidas do grupo das triazinas comportam-se como base fraca em solução.

- Os herbicidas que não doam e nem recebem prótons em solução são considerados não-iônicos, permanecendo em sua forma molecular em solução. Metolachlor, trifluralin, e EPTC são exemplos de herbicidas não-iônicos.

3.2 Coeficiente de partição octanol-água (K_{ow})

Este coeficiente refere-se à medida da intensidade da afinidade da molécula pela fase polar (representada pela água) e apolar (representada pelo 1-octanol). É uma medida da lipofilicidade da molécula. Valores de K_{ow} são adimensionais, sendo expressos normalmente na forma logarítmica ($\log K_{ow}$) e são constantes para uma certa molécula, a uma dada temperatura.

3.3 Solubilidade em água

Esta propriedade indica a quantidade máxima de uma molécula que se dissolve em água pura a uma determinada temperatura. A solubilidade em água pode ser considerada como a partição de uma molécula entre ela mesma e a água. Quanto maior a quantidade de grupos hidrofílicos que possui a substância (mais polar), maior será sua afinidade pela água, logo, maior sua solubilidade. Seu valor é expresso em miligramas do herbicida por litro de água (normalmente, a 25°C).

Alguns grupos de herbicidas, como as imidazolinonas e as sulfoniluréias apresentam solubilidade em água variando de acordo com o pH da solução. Isto porque esses herbicidas possuem grupos funcionais ionizáveis em sua estrutura que, de acordo com o pH do meio, podem apresentar-se protonados (forma molecular) ou desprotonados (forma ionizada). Assim, em valores de pH superiores ao seu pK_a , as moléculas encontram-se ionizadas, portanto, com maior solubilidade em solventes polares, como a água. Ao contrário, em valores de pH inferiores ao seu pK_a , encontram-se na forma molecular, apresentando maior afinidade por solventes de natureza apolar, como o octanol. Lee et al. (1990), estudando a influência do solvente e das características do solo na distribuição do pentaclorofenol nos sistemas octanol-água e solo-água, desenvolveram método que permite estimar a quantidade de moléculas na forma neutra, em solução, em função dos diferentes valores de pH, utilizando apenas o valor de pH do meio e da constante de ionização do ácido da molécula, ou o pK_a . Esses estudos também reforçam a variação no coeficiente de partição octanol-água de acordo com o pH. Na Tabela 3, encontram-se valores do pK_a e de solubilidade em água de alguns herbicidas, a pH 5 e 7.

3.4 Pressão de vapor

Trata-se de uma medida da tendência de volatilização no seu estado normal puro (sólido ou líquido). A pressão de vapor é uma função direta da temperatura e não indica em qual taxa o herbicida se volatilizará. A pressão de vapor de um herbicida é importante para avaliar sua distribuição

ou transferência no ambiente. É a principal propriedade do herbicida a ser usada no cálculo de sua volatilização e prevê se está entrando na atmosfera em concentrações significantes. A temperatura, a velocidade do vento e as condições do solo de um lugar em particular, assim como as características de adsorção e a solubilidade na água do composto, afetarão a taxa de volatilidade. Compostos com pressão de vapor $< 10^{-8}$ mm Hg estarão primariamente associados ao material particulado, enquanto que aqueles com pressão de vapor $> 10^{-4}$ mm Hg se encontrarão na fase vapor. Compostos com pressão de vapor entre estes dois valores poderão se apresentar nas duas fases.

Tabela 3. Efeito do pH sobre a solubilidade em água de algumas sulfoniluréias e imidazolinonas (Beyer et al., 1987; Ahrens, 1994; Hatzios, 1998).

Herbicidas	Constante de (pK _a)	Solubilidade em Água (mg L ⁻¹ a 25°C)	
		pH 5	pH 7
Chlorimuron ethyl	4,2	587	31.800
Chlorsulfuron	3,6	548	2.790
Imazapyr	1,9 e 3,6		11.272
Imazaquin	3,8	60	
Imazethapyr	3,9		1.400
Metsulfuron methyl	3,3	1.100	9.500
MON 37500	3,51	18	1.627
Nicosulfuron	4,3	360	12.200
Sulfometuron methyl	5,2	10	300

3.5 Fotodegradação ou degradação fotoquímica

Ocorre devido à absorção de luz pelo herbicida, especialmente a ultravioleta que é mais destrutiva (Radosevich et al., 1997), resultando na excitação de seus elétrons e, por consequência, no rompimento de determinadas ligações nas moléculas. Portanto, a degradação fotoquímica de determinado herbicida ocorrerá somente se houver presença de luz com capacidade de excitar seus elétrons, sendo específica para cada herbicida.

3.6 Constante da Lei de Henry (H)

Esta constante leva em conta o peso molecular, a solubilidade e a pressão de vapor, e indica o grau de volatilidade de um composto químico em uma solução. É um coeficiente de partição ar-líquido ou vapor-líquido, sendo definido pela equação:

$$H = P_i/C_i \quad (1)$$

em que P_i = pressão parcial na interface ar-água e C_i = concentração na interface ar-água. Valor de H elevado indica que os solutos são altamente voláteis e, geralmente, o seu valor diminui com o aumento da solubilidade do componente i . Um alto valor para a constante de um contaminante químico poderia sugerir que a inalação seria a principal via de exposição (Graveel & Turco, 1994). Segundo esses autores, para herbicidas no estado gasoso, a solubilidade em água é muito menos importante do que para aqueles na fase líquida e sólida. A solubilidade de gases é medida, normalmente, quando a pressão parcial do gás acima da solução é uma atmosfera, situação esta que difere da maioria das condições do meio ambiente. Um parâmetro muito mais importante para gases é a constante da lei de Henry, a qual descreve a relação da pressão atmosférica para as concentrações da solução em pressões parciais baixas.

4. Interações entre Fatores Ambientais e os Herbicidas e suas Consequências Agronômicas e Ambientais

4.1 Retenção

Os herbicidas aplicados nas lavouras, tanto em pré quanto em pós-emergência, na maioria das vezes, têm como destino final o solo. Ao atingi-lo, os produtos podem ser retidos pelos colóides ou permanecer na solução do solo. A retenção refere-se à habilidade do solo reter uma molécula orgânica, evitando que ela se mova tanto para dentro como para fora da matriz do solo. A retenção se constitui primariamente no processo de adsorção, mas também inclui a absorção pela matriz do solo, plantas e degradação pelos microrganismos. O processo controla e é controlado por transformações químicas e biológicas, influenciando o transporte das moléculas orgânicas para a atmosfera, águas subterrâneas e superficiais. Desta forma, a retenção é o fator que determina a eficiência dos agroquímicos aplicados no solo (Koskinen & Harper, 1990).

A adsorção dos agroquímicos é definida por Koskinen & Harper (1990) como o acúmulo da molécula orgânica na interface de duas fases, do tipo solo-água ou solo-ar. Geralmente, refere-se a processos reversíveis, envolvendo a atração das substâncias pela superfície das partículas do solo e sua retenção por determinado tempo. Esse tempo de retenção depende da afinidade da molécula pela superfície.

Don Wauchope et al. (2002), após revisarem diversos trabalhos, e Regitano et al. (2006) descrevem que a sorção e dessorção envolvem complexo sistema de processos com cinética rápida e lenta, podendo ocorrer em escalas descritas por três estágios de resposta, em função da mudança da

concentração da solução. Inicialmente, há rápida e reversível difusão do soluto próximo da interface solo/água. Esta etapa pode ser medida em minutos, podendo chegar a horas. Em seguida, observa-se movimento lento do pesticida entre as fases sólida e aquosa, que pode demorar horas, um dia ou até dois dias para atingir o equilíbrio. Esta mudança parece ser reversível. Finalmente, reação muito lenta, comumente chamada envelhecimento, é caracterizada pela remoção do pesticida da solução irreversivelmente. Segundo esses autores, esse processo pode demorar de semanas a anos e poderá não ser observado em experimentos que finalizam em um ou dois dias, como por exemplo, “batch equilibration” ou equilíbrio de partição. Envelhecimento é caracterizado pelo armazenamento intacto do produto que poderá ser liberado em processos subsequentes. O aumento da persistência do herbicida no solo reduz sua biodisponibilidade. Esse fato é caracterizado pelo decréscimo na taxa de biodegradação, com o processo de envelhecimento do resíduo de pesticida no solo. Em alguns casos, a quantidade sorvida do pesticida torna-se totalmente resistente à degradação microbiológica, enquanto, em outros, sorção somente reduz sua taxa de liberação, não eliminando a biodegradação. [Regitano et al. \(2006\)](#) verificaram alta eficiência das soluções 0,01 M CaCl_2 e metanol aquoso na extração de resíduos ligados de simazina, em diferentes solos, sem a contribuição do processo de dessorção, comparativamente com o processo de degradação microbiológica. Esses autores concluem que a extração da simazina em solos envelhecidos pode ser realizada por estas duas soluções, como bom parâmetro de estimar sua biodisponibilidade.

Para compreender o mecanismo de sorção, é fundamental determinar as características termodinâmicas da reação de equilíbrio entre a concentração do herbicida sorvido e aquela em equilíbrio na solução, visto que estas características indicam a direção da reação de sorção, o grau de interação do herbicida com a solução do solo e sua força de ligação à matriz do solo ([Koskinen & Harper, 1990](#)). O conhecimento deste processo se dá pelo entendimento de parâmetros medidos experimentalmente. Além do coeficiente de sorção, que será detalhado à frente, o valor da energia livre, além de medir a força que guia determinada reação, também indica quanto distante do equilíbrio está o estado inicial do sistema. Valores negativos do parâmetro indicam que as formas sorvidas do pesticida são mais estáveis do que aquelas em solução.

Além da adsorção na superfície das partículas do solo, também pode ocorrer a precipitação das moléculas ou sua ligação covalente com as partículas, sendo, portanto, difícil diferenciar tais processos de sua absorção pelas partículas e degradação pelos microrganismos. Na prática, a quantidade adsorvida é determinada somente pela perda da substância em solução; por isto, a adsorção é frequentemente denominada pelo termo mais geral, sorção. Portanto, sorção refere-se ao processo de retenção geral, sem

distinção entre os processos específicos, como adsorção, absorção e precipitação. Por outro lado, o retorno à solução do solo ou a liberação da substância sorvida é chamada de dessorção. Na maioria dos casos, os processos de adsorção e dessorção estão interligados e em equilíbrio (Hassett & Banwart, 1989).

Sorção-dessorção é um processo dinâmico em que as moléculas são continuamente transferidas entre a solução e a superfície do solo. As diferentes forças intermoleculares que podem atrair as moléculas para a interface e, subsequentemente, retê-las na superfície são as ligações hidrofóbicas, pontes de hidrogênio, forças de van der Waals, ligações iônicas e covalentes, dependendo do tipo de colóide existente no solo (Bailey & White, 1970; Hassett & Banwart, 1989). As reações de sorção-dessorção são afetadas pelas propriedades físico-químicas dos solos e dos pesticidas e fortemente influenciadas pelo tempo de contato do pesticida com o solo, ou seja, pelo envelhecimento. Segundo Regitano et al. (2006), o mecanismo pelo qual esses compostos tornam-se sorvidos ou sequestrados com o tempo são, em geral, pouco conhecidos. Esses autores descrevem que a difusão lenta dentro de pequenos poros dos agregados dos solos, a partição hidrofóbica dentro de materiais húmicos, a retenção nas superfícies de pequenos poros hidrofóbicos e a sorção dentro de sítios da matéria orgânica que possuem características que não facilitam o processo de dessorção são possíveis mecanismos envolvidos no processo de envelhecimento.

O conhecimento dos mecanismos envolvidos no processo de sorção dos herbicidas permite conhecer a natureza da ligação herbicida-colóide do solo que está envolvida na adsorção. Trabalhos realizados por Johnston et al. (2001, 2002) descrevem os mecanismos envolvidos na adsorção do herbicida dinoseb em argilas. Além da quantificação do produto retido pelas argilas, utilizando cromatografia líquida de alta performance e espectroscopia de infravermelho, estes autores descrevem as reações químicas envolvidas entre os sítios adsorptivos das argilas e do herbicida. Os mecanismos envolvidos na adsorção da atrazina por partículas orgânicas foi descrito por Martin-Neto et al. (2001). Segundo estes autores, a sorção da atrazina foi relacionada principalmente com a matéria orgânica do solo e a partição hidrofóbica foi o principal mecanismo de sorção descrito.

Associado a isto, outro conceito, discutido por Lavorenti et al. (2003) e Peixoto et al. (2005), define resíduo ligado como a interação de espécies químicas originadas da transformação ou não de pesticidas com uma matriz (solo, planta ou animal), não sendo passíveis de extração por métodos que não alterem substancialmente a natureza da molécula e da matriz. De acordo com Gamble et al. (2000), a formação de resíduo ligado pode apresentar duas fases distintas: uma fase rápida (aproximadamente 24 h), provavelmente determinada por processos de superfície, seguida de uma fase lenta, na qual a formação de resíduo ligado ocorre por difusão da molécula no interior das substâncias húmicas. Por outro lado, o termo

remobilização é utilizado quando, por qualquer razão, o resíduo ligado de pesticida é submetido a futura mobilização, explicando a nova organização que está começando a acontecer com o pesticida. O conhecimento deste tipo de resíduo é importante, visto que sua liberação ocorre muito lentamente e em extensão mínima. Esse fato é evidenciado na maioria das observações disponíveis, principalmente devido à lenta reciclagem da matéria orgânica, principal sítio de sorção para a maioria dos pesticidas. As moléculas, quando apresentam baixa tendência à formação de resíduo ligado e são pouco degradadas, tendem a permanecer na solução do solo, podendo ser absorvidas por raízes de plantas ou lixiviadas para camadas subsuperficiais do perfil. Tudo isto ocorre simultaneamente, em intensidades diferentes, e depende das propriedades físico-químicas do herbicida, do solo e dos fatores climáticos (Lavorenti et al., 2003; Peixoto et al., 2005). Trabalhos citados por esses autores descrevem que existem diferentes grupos de microrganismos com variável habilidade em liberar resíduos ligados. Além dos estudos sobre a quantidade do produto retido no solo, o conhecimento da natureza da interação pesticida-partícula do solo, ou seja, o mecanismo de adsorção é importante para explicar a natureza dos fenômenos que estão envolvidos na adsorção.

O estudo da interação pesticida-solo, seja utilizando os processos de sorção-dessorção descritos pelo coeficiente de Freundlich, seja por ensaios biológicos, deve ser realizado analisando-se conjuntamente todas as variáveis descritivas do solo, visando conhecer e quantificar o efeito destas variáveis nos processos de interação. Esse tipo de análise permite não apenas conhecer os efeitos isolados de cada propriedade do solo, mas as possíveis interações dos diversos fatores num único modelo, visto que as propriedades do solo são intercorrelacionadas.

Os métodos de medição de sorção podem ser diretos ou indiretos. Ambos requerem o equilíbrio de soluções aquosas do agroquímico em concentrações inicialmente conhecidas com amostras de solo. O método direto envolve a quantificação da substância em solução e do adsorvido pelos colóides do solo. Após o equilíbrio, a quantidade sorvida é retirada do solo por uma mistura de solventes adequada e quantificada diretamente. Por outro lado, pelo método indireto, mede-se apenas o agroquímico em solução. A quantidade adsorvida é calculada indiretamente pela diferença entre aquela adicionada e a remanescente em solução (Green & Karickhoff, 1990). Outro método utilizado para determinar a capacidade de sorção dos solos é o método do fluxo em colunas de vidro preenchidas com solo, também conhecido como deslocamento miscível. Neste método, uma solução com uma concentração conhecida do pesticida é percolada através da coluna. O movimento da molécula do ponto onde foi introduzida (topo da coluna) até à saída na base da coluna, que normalmente, mede 0,2 m, pode ser descrito por uma “breakthrough curve” (BTC). Esta técnica tem sido bastante utilizada para avaliar a lixiviação e redistribuição de agrotóxicos

no solo, auxiliando no entendimento de interações químicas e físicas envolvidas no movimento de agrotóxicos, como, por exemplo, o não equilíbrio químico/físico (Barizon et al., 2006).

O método indireto mais comum para a quantificação da sorção é o “batch equilibration” ou método de equilíbrio de partição, o qual consiste em se agitar a mistura solo/solução contendo o agroquímico por tempo suficiente para atingir o equilíbrio aparente do sistema. As variáveis experimentais que devem ser previamente estabelecidas incluem a relação solo/solução, temperatura, histórico de uso do solo, material utilizado e natureza da agitação. Estas variáveis não são padronizadas e podem ter efeito significativo nos resultados. Em geral, maior retenção dos agroquímicos ocorre quando se utiliza relação solo:solução mais estreita e temperaturas mais baixas (Green & Karickhoff, 1990).

Vários autores (Hassett & Banwart, 1989; Koskinen & Harper, 1990) têm descrito a sorção dos agroquímicos no solo por meio de uma isoterma de adsorção, como a equação de Freundlich:

$$X = K_f C^n \quad (2)$$

em que X é a quantidade do agroquímico adsorvido ($\mu\text{g g}^{-1}$ solo), C a concentração de equilíbrio do agroquímico em solução ($\mu\text{g mL}^{-1}$) e K_f e n são constantes para determinado solo. O valor de K_f diz respeito à afinidade da molécula com o solo, ou seja, a força de adsorção do agroquímico pelo solo. O valor de n, comumente referido como $1/n$ está relacionado com a linearidade do modelo (Schwarzenbach et al., 1992). Valores de $n < 1$, refletem a situação em que aumentos na concentração adsorvida do agroquímico tornam mais difícil a adsorção de moléculas adicionais. Esse caso pode ocorrer quando os sítios específicos de ligação são preenchidos e os sítios restantes são menos atrativos para as moléculas restantes. Ao contrário, valor de $n > 1$ descreve os casos em que a adsorção das moléculas modifica a superfície adsorvente, favorecendo futuras adsorções. Valores de $n = 1$ refletem as situações em que a afinidade dos agroquímicos permanece a mesma em todos os níveis de concentração adsorvida (Schwarzenbach et al., 1992). Assumindo que o equilíbrio da mistura solo-solução herbicida é praticamente atingido nos experimentos de equilíbrio em batelada, a situação comumente observada que descreve a equação de Freundlich é o decréscimo gradual nos valores de K_d com o aumento aparente na concentração de equilíbrio, dando isoterma não linear com curva negativa. Em geral, os valores de $1/n$ variam entre o mínimo de 0,7 e o máximo de 1,0 (Don Wauchope et al., 2002). Ainda segundo esses autores, isotermas não-lineares são observadas para pesticidas de menor hidrofobicidade e, além disto, não limitados por solubilidade em concentrações muito baixas. Portanto, qualquer estudo de sorção que tenha diferença entre a menor e

a maior concentração variando em dobro, mesmo que para valores muito baixos, em geral, apresentará forma não-linear, possivelmente devido ao baixo número de sítios de cada nível de energia.

Quando o valor de n é igual a 1, ou seja, a quantidade da substância-teste adsorvida é diretamente proporcional à sua concentração em solução, um coeficiente de distribuição K_d pode ser calculado. Esse coeficiente fornece uma medida da distribuição relativa do herbicida entre o adsorvente (argila, matéria orgânica) e o solvente (usualmente a água):

$$K_d = X/C \quad (3)$$

em que X é a quantidade do agroquímico adsorvido ($\mu\text{g g}^{-1}$ solo) e C a concentração de equilíbrio do agroquímico em solução ($\mu\text{g mL}^{-1}$).

A quantidade de herbicida adsorvido depende de suas propriedades químicas, das características físico-químicas do solo, principalmente da superfície específica e da capacidade de troca catiônica (CTC) dos minerais da fração argila, da formulação, da dose aplicada do produto e das condições climáticas. Por isto, informações obtidas em determinados locais, quando extrapoladas para outras regiões de clima e solo diferentes, apresentam sempre um valor relativo (Blanco et al., 1983).

A matéria orgânica, devido à sua alta capacidade de troca de cátions e grande superfície específica, tem papel importante na adsorção de herbicidas no solo. Por outro lado, o teor de minerais 2:1 como vermiculita e montmorilonita, apresenta influência pouco menor em relação à matéria orgânica sobre a adsorção dos herbicidas (Bailey & White, 1970; Stevenson, 1982).

Trabalhos de Sun e Boyd, citados por Werkheiser & Anderson (1996), demonstram que os surfactantes causam redução na sorção de compostos com baixa solubilidade em água e altos coeficientes de sorção, mas causam aumento na sorção dos compostos com alta solubilidade em água e baixos coeficientes de sorção. O surfactante Triton X-77, 0,25% vv^{-1} causou aumento da sorção do primissulfuron em solos com baixos teores de CO, causando queda na sorção nos solos com 1,7% de CO.

Recentemente, alguns autores têm procurado correlacionar a intensidade da sorção dos agroquímicos com algumas de suas características, tais como solubilidade em água e o coeficiente de partição octanol-água. Para substâncias não ionizáveis, a adsorção tende a ser tão mais intensa quanto menor a solubilidade em água e quanto maiores os valores do coeficiente de partição (Hassett & Banwart, 1989). Por outro lado, quando se consideram substâncias ionizáveis, os resultados obtidos podem mostrar-se contraditórios, impossibilitando o estabelecimento de uma regra geral correlacionando a intensidade de adsorção no solo e a solubilidade ou mesmo o coeficiente

de partição de herbicidas (Bailey & White, 1970). Para substâncias polares ionizáveis, como bases fracas (atrazine), fatores relacionados ao solo, como teor de argila e pH, também influenciam a sorção (Oliveira Jr. et al., 1999).

A natureza orgânica dos herbicidas e sua alta afinidade pela matéria orgânica tornam o teor de carbono orgânico do solo o melhor parâmetro isolado para prever o coeficiente de partição para as moléculas hidrofóbicas, não-iônicas (Karickhoff, 1981). O coeficiente de partição (K_d) para um determinado pesticida, quando normalizado para o teor de carbono orgânico do solo, seria essencialmente independente do tipo de solo (Wagenet & Rao, 1990). Isto levou à definição do coeficiente de partição normalizado para o teor de carbono orgânico, K_{oc} :

$$K_{oc} = K_d / \%CO \quad (4)$$

O K_{oc} reflete a tendência de adsorção do herbicida pelo carbono orgânico do solo. Quanto mais hidrofóbica uma molécula, maior sua tendência de partição da água para a fase orgânica. Quando a ligação hidrofóbica é a principal responsável pela adsorção de determinada molécula orgânica, os valores de K_{oc} serão bem constantes entre diferentes solos. O K_{oc} tem sido constantemente correlacionado com uma outra propriedade química dos herbicidas, denominada coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}). Considera-se que a afinidade pelo octanol serve como um indicativo do grau de lipofilicidade e, portanto, também da afinidade com a MO do solo (Schwarzenbach et al., 1992).

Segundo Guimarães (1992), o K_{ow} também pode ser usado como indicador do potencial de bioacumulação em organismos vivos. O potencial de acumulação é um fator importante na avaliação de risco; em conjunto com dados de degradação, o potencial de acumulação pode ser utilizado para identificar produtos químicos que podem ser bioacumulados através da cadeia alimentar.

O K_{oc} é comumente usado em modelos matemáticos para avaliar a transformação e o potencial de transporte de herbicidas no ambiente. Em geral, tem-se considerado que a solubilidade de um herbicida e o coeficiente de sorção ao solo (K_{oc}) são inversamente relacionados, isto é, um aumento na solubilidade resulta em menor adsorção. Porém, esta generalização não pode ser feita para substâncias ionizáveis, devido à obtenção de resultados contraditórios.

Os valores dos coeficientes de sorção podem ser utilizados como índice de retenção dos herbicidas pelo solo, possibilitando inferir sobre o seu destino no ambiente. Recentemente, pesquisadores têm buscado novos métodos de utilização dos herbicidas com menor risco ambiental. Nesse

sentido, novas técnicas, como a agricultura de precisão, têm sido desenvolvidas para possibilitar a aplicação de doses diferenciadas dos herbicidas em função das características do solo que mais influenciam na sua retenção e, por consequência, na sua disponibilidade para as plantas. Aplicações de doses de alachlor em função da declividade da área (Khakural et al., 1994) e de imazethapyr em função do pH do solo (Oliveira Jr. et al., 1999) são exemplos de aplicação deste conceito. Alguns pesquisadores têm utilizado sensores para a aplicação de doses diferenciadas, por exemplo, em função do teor de matéria orgânica do solo (Gerstl, 2000; Made Anon et al., 2000). Entretanto, a eficiência desta técnica é relativamente baixa, devido a sua forte dependência da textura e da rugosidade do solo, dos teores de óxido de ferro e da umidade. Esses fatores têm dificultado a sua utilização no campo, principalmente em solos brasileiros, nos quais o teor de matéria orgânica é baixo e a presença de ferro é abundante.

A utilização dos coeficientes de sorção visando recomendação de doses diferenciadas de herbicidas baseia-se no fato de que as propriedades físicas e químicas dos solos no campo variam tanto no espaço quanto no tempo. Variabilidade espacial são as variações naturais nas características do solo, como tamanho de partículas, pH e teor de CO₂, que podem resultar do processo de formação do solo (Rao & Wagenet, 1985) ou do manejo adotado. A variabilidade espacial afeta o destino dos pesticidas, pois afeta diretamente processos como a sorção e o transporte (Oliveira Jr., 1998). O aprofundamento do conhecimento dos fatores que influenciam a sorção dos herbicidas no solo pode gerar subsídios úteis para a implementação de uma agricultura de precisão. Segundo Oliveira Jr. (1998), o manejo diferenciado de doses na aplicação de herbicidas pode contribuir para a redução das concentrações de herbicidas na água de escoamento superficial, aumento na eficiência da utilização de herbicidas e identificação de áreas de campo com alto potencial de perdas por lixiviação para o lençol aquático subterrâneo. Nesse sentido, Oliveira et al. (2004), avaliando o efeito da variabilidade do pH e da matéria orgânica numa área de 38 ha de Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, sob diferentes manejos, na retenção do herbicida imazaquin, verificaram maior retenção do produto nas áreas com menores valores de pH e altos teores de matéria orgânica, ou seja, nas áreas onde o plantio direto foi utilizado por longo tempo. Esses autores produziram mapa de distribuição dos valores de K_d obtidos com as amostras coletadas na área (Figura 3), demonstrando a importância da variabilidade espacial dos parâmetros que afetam a sorção e o destino do imazaquin no solo, dependentes das propriedades físico-químicas do herbicida e, principalmente, do conteúdo de matéria orgânica e do pH do solo.

A análise da influência das propriedades físico-químicas do solo na retenção dos herbicidas, especificamente na variação dos valores do coeficiente de sorção de Freundlich, K_f , para mesma classe de solo, deve ser

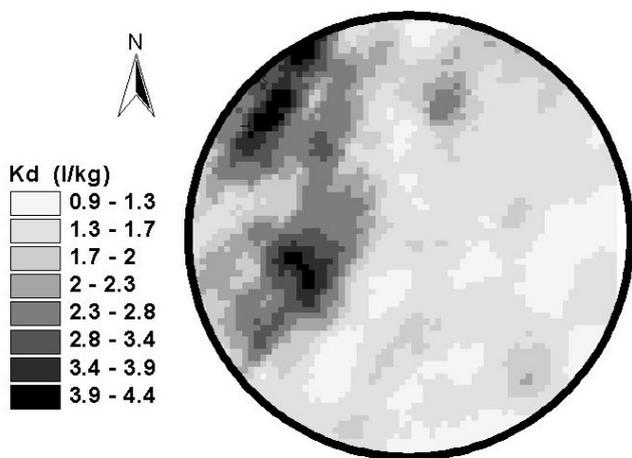


Figura 3. Mapa com os valores estimados de K_d ($L\ kg^{-1}$) agrupados segundo método Kriging, para população de amostras coletadas na área de 38 ha (Oliveira et al., 2004).

realizada considerando-se todas as propriedades. Isto porque a característica que a solução do solo apresenta num dado momento é função das diferentes propriedades agindo conjuntamente, ou seja, do pH, da concentração salina ou força iônica e do potencial de óxido-redução, que são, na realidade, dependentes da natureza dos constituintes do solo, argila e matéria orgânica. Portanto, modelos preditivos que descrevam valores de K_f devem ser ajustados utilizando maior número de parâmetros de solo (Inoue et al., 2006; Oliveira et al., 2004). Na Figura 4, a sorção do imazaquin em amostras de Latossolo em função dos valores de pH e MO é descrita em função da combinação dos dois parâmetros. Aumentos nos valores de pH acarretaram aumento nos valores de K_d em baixos níveis de matéria orgânica. Por outro lado, em amostras com altos níveis de matéria orgânica, aumentos nos valores de pH reduziram os valores de K_d . O efeito do aumento do teor de matéria orgânica em baixos e altos valores de pH afetou diferentemente os valores de K_d . O teor de matéria orgânica promoveu aumento na retenção do produto em baixos níveis de pH, enquanto, em altos valores de pH, o aumento do teor de matéria orgânica reduziu a retenção do produto.

Associado a isto, estudo realizado por (Gonese & Weber, 1998) descreve que as doses recomendadas de herbicidas aplicadas no solo são espe-

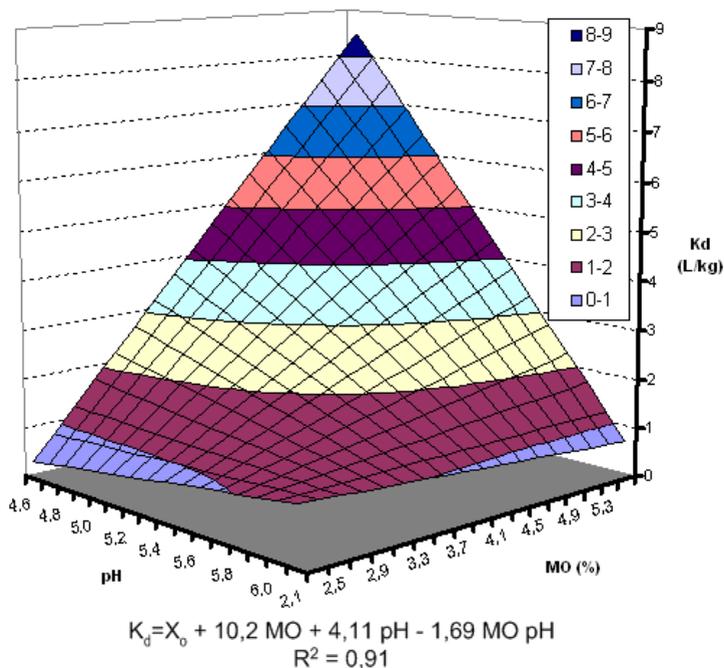


Figura 4. Valores de K_d para sorção do imazaquin em amostras de mesmo solo com diferentes valores de pH e matéria orgânica (Oliveira et al., 2004).

cificadas no registro dos produtos e, na maioria dos casos, variam com a textura do solo, a matéria orgânica do solo e, em alguns casos, com o pH do solo. A quantidade de fertilizantes recomendada é usualmente baseada nos resultados de análise do solo. Esses autores citam que alguns trabalhos descrevem a recomendação de doses de herbicidas em função da análise do solo, devido ao alto custo dos produtos e de sua aplicação, além da crescente pressão ambiental, tanto devido às questões residuais para culturas subsequentes quanto à contaminação de rios e lagos. O efeito das propriedades dos Latossolos na sorção dos pesticidas ácidos fracos: imazaquin, prosulfuron e pentaclorofenol é bem discutido por Ferreira et al. (2002); Hyun et al. (2003); Hyun & Lee (2004), respectivamente. Este autores descrevem a importância de diferentes propriedades físico-químicas do solo e de minerais de argila, como por exemplo, troca aniônica, troca catiônica, pH, ponto de efeito salino na sorção destas moléculas.

4.2 Lixiviação

O movimento descendente dos herbicidas na matriz solo ou com a água do solo é chamado de lixiviação ou percolação. Para ser lixiviado, o herbicida deve estar na solução do solo, livre ou adsorvido a pequenas partículas, como argilas, ácidos fúlvicos e húmicos de baixo peso molecular, aminoácidos, peptídeos e açúcares, entre outros.

A intensidade de lixiviação de um herbicida é função das suas características físico-químicas e das características do solo e clima.

Os fatores que afetam a lixiviação de determinado herbicida são sua retenção pelos colóides do solo, o pH e o teor de água do solo, persistência no solo e potencial de remobilização, a topografia ou declividade da área, a intensidade da chuva ou irrigação após aplicação e o manejo do solo. Quanto maior a retenção do produto pelos colóides do solo e, conseqüentemente, menor sua dessorção, menor a quantidade do produto em solução propensa à lixiviação. Para a maioria dos herbicidas, especialmente os não-iônicos, o teor de matéria orgânica do solo é o constituinte que mais se correlaciona com sua adsorção e movimento. O pH do solo apresenta efeito variável dependendo do grupo químico do herbicida. Alguns herbicidas do grupo das triazinas têm mostrado menor mobilidade em solos minerais ácidos do que em solos com valores de pH próximos do neutro ou alcalinos (Fruhstorfer et al., 1993; Koskinen & Clay, 1997). As sulfoniluréias, de modo geral, apresentam grande mobilidade em solos alcalinos (Blair & Martin, 1988; Smith, 1995). A capacidade de retenção de água do solo apresenta efeito direto na lixiviação dos herbicidas, pois reduz a adsorção das moléculas. O teor de água é especialmente importante quando o produto é aplicado em solo úmido e, em seguida, ocorre forte chuva ou irrigação.

O movimento lateral dos herbicidas pode ocorrer em áreas inclinadas, ao passo que lixiviação vertical no solo deve ser esperada em áreas mais planas. A intensidade da chuva é muito importante para terras de baixada, pois pode haver acúmulo de água. Por outro lado, chuvas frequentes e muito intensas, que superam a capacidade de infiltração da água no solo, podem acarretar mais perdas dos herbicidas por meio do escoamento superficial (*runoff*). Desta forma, o manejo do solo pode afetar a capacidade de infiltração da água no solo, logo, sua lixiviação.

Os fatores relacionados aos herbicidas que afetam seu movimento no solo são: características físico-químicas das moléculas, solubilidade em água, formulação e aditivos. Quanto maior a solubilidade de um herbicida, mais facilmente ele estará dissolvido na solução do solo e poderá ser mais arrastado. A reatividade de uma molécula está ligada às suas cargas iônicas ou residuais. Um herbicida que se apresente com carga residual positiva na solução do solo tende a ser fortemente adsorvido aos colóides do solo e, portanto, está menos sujeito à lixiviação. Pequenas mudanças na estrutura química dos herbicidas podem aumentar ou diminuir sua mobilidade no solo. Por exemplo, prometryne é muito semelhante quimicamente

à propazina, sendo, no entanto, muito menos propenso à lixiviação (Abernathy, 1994). As formulações éster do 2,4-D e do chloramben apresentam menor mobilidade que as respectivas formulações na forma de sal.

Herbicidas de maior persistência no solo apresentam também maior risco de contaminação de águas subterrâneas. Isto porque os mais persistentes, geralmente, são mais adsorvidos e menos disponíveis para a degradação microbiológica, podendo ser lentamente liberados para a solução do solo.

O movimento dos herbicidas no solo tem grande influência na sua performance no campo. Pequena lixiviação é desejável, pois pode tornar o herbicida mais eficiente, movendo-o da superfície do solo para onde estão concentradas as sementes das plantas daninhas, uma vez que, em geral, a maioria das sementes das espécies daninhas com potencial de germinação em uma determinada área se encontram nos 5 cm superficiais do solo. Esta pequena lixiviação é mais importante para os herbicidas que agem quando da germinação das sementes ou sobre plântulas, assim como para os de baixa solubilidade em água. O flumioxazin, solubilidade de 4 mg L^{-1} a 25°C , apresentou pequena movimentação em colunas de solo, não ultrapassando os 5 cm superficiais da mesma, quando aplicado em solo seco ou úmido. O metribuzin, solubilidade de 1.100 mg L^{-1} a 25°C , quando aplicado em um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico, fase terraço, ultrapassou os 5 cm superficiais da coluna após simulação de chuva de 45 e 90 mm, independente do teor de umidade no momento da aplicação do herbicida (Oliveira, 1995). De acordo com esses dados, a eficiência de controle das plantas daninhas pelo metribuzin poderá ser afetada pelo teor de umidade do solo antes da aplicação e pela intensidade de chuva após aplicação.

Além dos aspectos físico-químicos dos produtos estarem relacionados com o seu comportamento no solo, os pesticidas ligados aos colóides são facilmente passíveis de lixiviação, especialmente por fluxo preferencial.

A lixiviação pode explicar a seletividade ou a falta de seletividade do herbicida. Herbicidas que não são lixiviados para o local onde está localizada a semente da cultura ou partes vegetativas utilizadas na propagação podem ser utilizados para o controle de plantas daninhas, mesmo em casos em que a cultura não é tolerante. A seletividade do herbicida pendimethalin em milho deve-se à sua baixa movimentação no solo. Por outro lado, a lixiviação excessiva pode levar o herbicida até próximo às sementes em germinação ou às raízes da cultura, causando injúrias. Contrariamente ao movimento descendente no perfil do solo, pode ocorrer movimento ascendente de herbicidas com alta solubilidade em água pelo fluxo capilar, especialmente quando aplicados em regiões quentes, sob irrigação (Mangels, 1991).

A lixiviação pode auxiliar na remoção do herbicida do solo, sendo desejável quando o seu resíduo for propenso a provocar injúria na cultura

subsequente. Porém, a lixiviação é indesejável no caso em que a aplicação do herbicida visa eliminar totalmente as invasoras. Por outro lado, a lixiviação excessiva pode contribuir para o herbicida ser arrastado até o lençol freático, podendo acarretar contaminações indesejáveis. Nos Estados Unidos e na Europa, os herbicidas mais frequentemente detectados em amostras de água do subsolo são atrazina e alachlor (Buser, 1990; Ritter, 1990; Killeen, 1997; Kolpin et al., 1997).

Além dos aspectos de eficiência agrônômica, estudos de campo visando conhecer a movimentação dos herbicidas no solo são fundamentais para prever o potencial de contaminação do produto. O intenso uso de pesticidas para a produção de grãos na região de cerrados do Brasil, tem sido descrito como potencial poluidor de águas subterrâneas. Nesse sentido, estudos recentes realizados por Laabs et al. (2002) descrevem a degradação e a lixiviação de herbicidas polares em subsolos brasileiros, em experimentos conduzidos por curto e médio prazos. Estes autores descrevem a presença de alachlor, atrazine, metolachlor, simazine e trifluralin no perfil do solo e no lixiviado, coletado em lisímetros com 95 cm de profundidade. Estes trabalhos sugerem que estudos de monitoramento destes produtos em locais de fonte de água subterrânea devem ser realizados em regiões tropicais do Brasil (Laabs et al., 2002).

A lixiviação de pesticidas no campo pode ser monitorada por amostragem direta da água subterrânea, análise de amostras de solo ou estudos com lisímetros. A utilização de amostras de solo para estudos visando conhecer a translocação vertical dos pesticidas no perfil do solo ao longo do tempo pode ser utilizada com sucesso. Esta metodologia pode não apresentar sucesso devido à falta de homogeneidade na distribuição dos caminhos de fluxo preferencial, que não pode ser amostrada. Para solos com este tipo de percolação, pesticidas precisam ser monitorados em água percolada, utilizando, como por exemplo, lisímetros.

A dinâmica de água e soluto em Latossolo vermelho-distrófico cultivado com milho, em sistema de plantio direto com aplicação de atrazine foi estudada por Camilo de Lelis T. de Andrade (informação pessoal) em Sete Lagoas, MG, no ano de 2003. Neste estudo, as concentrações do herbicida atrazine foram maiores que $2 \mu\text{g L}^{-1}$ em diferentes épocas de amostragem durante o cultivo, mesmo nos tratamentos com irrigação normal ou com déficit. Os piques de concentração elevada do herbicida na água foram atribuídos pelos autores ao fluxo preferencial da água através de poros grandes ou de orifícios deixados por raízes e mesofauna, comuns no sistema de plantio direto. Apesar dos piques de concentração, a quantidade de atrazine removida, via lixiviação, não chegou a 1% da quantidade aplicada, indicando que parte do produto foi degradado, conseqüentemente, não foi detectado pelo cromatógrafo, ou permaneceu adsorvido ao solo.

4.3 Degradação

Conhecer a degradação dos herbicidas no solo é importante. Herbicida ideal é aquele que permanece ativo no ambiente por tempo suficientemente longo para o controle das plantas daninhas em determinada cultura, porém não tão longo que cause injúria às culturas susceptíveis que venham em rotação/sucessão.

A degradação do herbicida refere-se a mudanças na natureza química da molécula por processos físicos (fotodecomposição), químicos (oxidação-redução, hidrólise, formação de sais insolúveis em água e complexos químicos) ou biológicos (degradação microbiológica). A degradação, de modo geral, é importante por reduzir o nível de resíduo dos pesticidas no solo. As transformações químicas e biológicas são os processos mais importantes na degradação dos herbicidas no solo.

A susceptibilidade ou a resistência de um produto à degradação determinará, em última análise, seu tempo de permanência em determinado meio. A persistência de um herbicida no solo pode ser definida como a habilidade que um composto tem para reter a integridade de sua molécula e consequentemente suas características físicas, químicas e funcionais no ambiente.

Fotodecomposição ou fotólise é a degradação de uma molécula pela radiação solar. As moléculas dos herbicidas podem absorver particular comprimento de luz. Em alguns casos, a energia absorvida é dissipada pela quebra de ligação química na molécula. Exemplos de herbicidas que podem ser rapidamente fotodecompostos são trifluralin, napropamid e paraquat, enquanto as feniluréias podem sofrer fotodecomposição quando submetidas a longos períodos de luz. Herbicidas que agem no solo e que são rapidamente fotodecompostos necessitam incorporação no solo para serem efetivos.

A incidência de radiação na superfície do solo com comprimento de onda menor que 300 nm é desprezível (Reichardt, 1996). Herbicidas que absorvem luz em comprimentos de onda menores que 300 nm não são, portanto, fotodecompostos. No entanto, em determinadas condições, pequena quantidade de fotodecomposição pode ocorrer para alguns herbicidas que absorvem luz em comprimentos de onda acima de 300 nm, como, por exemplo, a fotodecomposição do chlorsulfuron, que, apesar de não absorver luz em comprimentos inferiores a 300 nm, apresentou pouca degradação em água coletada em rio. Esta degradação foi atribuída à absorção da luz por outros compostos presentes na água, os quais podem ter gerado espécies de oxigênio reativo capazes de degradar o herbicida.

Se, por um lado, a fotodecomposição pode ser benéfica, reduzindo a persistência excessiva de resíduos no solo, por outro lado, pode ser indesejável, pois pode reduzir a eficiência de controle das plantas daninhas quando ocorrer rapidamente após a aplicação do herbicida.

Para o herbicida ser degradado, química ou biologicamente, esse deve estar na solução do solo, ou fracamente adsorvido. Quando fortemente adsorvido pelos colóides do solo, torna-se indisponível para degradação pelos microrganismos do solo ou reações químicas diversas. Aspectos relacionados à remobilização dos herbicidas são importantes para os processos de degradação.

Com respeito à degradação biológica de herbicidas no sistema edáfico, são de particular importância os microrganismos do solo e as plantas superiores em geral, tanto as cultivadas quanto as não-cultivadas.

O grande número de microrganismos presentes no solo, como bactérias, fungos e actinomicetos, capazes de degradar os diversos compostos orgânicos, também degradam as moléculas dos herbicidas. A atividade destes microrganismos no solo é influenciada grandemente por fatores ambientais, como teor de matéria orgânica, pH, nível de fertilidade, temperatura e nível de umidade do solo, sendo os dois últimos fatores os mais importantes. Além disto, o histórico de utilização do herbicida em determinada área também influencia a taxa de decomposição microbiológica dos herbicidas. Em geral, o ambiente solo que favorece altos níveis de atividade microbiológica resulta em reduzida persistência de herbicidas. A degradação microbiológica dos herbicidas pode ocorrer segundo dois caminhos distintos. Primeiro, por meio de uma ação adaptativa da microbiota e, segundo, devido à degradação acidental.

Aplicações repetidas do mesmo princípio ativo numa mesma área podem selecionar uma microbiota específica, devido à utilização como fonte de alimento para crescimento. Devido às vantagens competitivas, muitas vezes determinada população microbiota é beneficiada, havendo rápido crescimento, sobrepondo as outras populações. Com o rápido aumento da população, há degradação mais rápida do herbicida. Esse tipo de degradação microbiológica recebe o nome de ação adaptativa da microbiota.

Na degradação por ação adaptativa da microbiota, inicialmente, a presença de determinado herbicida serve como estímulo para que a microbiota induza a produção de enzimas capazes de degradar a molécula do princípio ativo. A indução da enzima é um processo rápido, ocorrendo na maioria das vezes, em poucos dias. O tempo que vai da indução enzimática até a proliferação da população da microbiota é chamado de fase *lag*. A duração desta fase *lag* pode variar com as condições e com o herbicida, mas tem sido descrita como sendo de cerca de duas semanas para os herbicidas fenólicos. A fase *lag* também tem sido observada para outros herbicidas, como os carbamatos e acetanilidas (Appleby & Dawson, 1994).

O rápido desenvolvimento da microbiota do solo capaz de degradar rapidamente o herbicida é conhecido como “enriquecimento do solo”. Esse enriquecimento pode durar considerável período de tempo, podendo ser, inclusive, superior ao tempo de desaparecimento do herbicida. O “enriquecimento do solo” é fator muito importante para os herbicidas aplicados em

pré-emergência, podendo não ter efeito prático ou efeito limitado para os pós-emergentes. Alguns autores (Leistra & Green, 1990; Radosevich et al., 1997) demonstraram redução no controle de plantas daninhas devido a repetidas aplicações numa mesma área, muito embora os dados da literatura para alguns herbicidas sejam discordantes. A degradação microbiológica acelerada pode ocorrer tanto para aplicações do mesmo herbicida quanto para herbicidas do mesmo grupo químico.

Outra forma de degradação dos herbicidas pela microbiota é a chamada degradação acidental. Contrariamente à ação adaptativa da microbiota, em muitos casos, a microbiota do solo não depende do herbicida como sua maior fonte de alimento, não recebendo vantagem particular nisto. Nesse caso, não há mudança na população da microbiota, e os microrganismos degradam os herbicidas se esses estiverem em seu caminho. Portanto, não há fase *lag*, nem enriquecimento do solo. Esse tipo de degradação é aparentemente comum no caso das triazinas simétricas, uracilas, uréias substituídas e, provavelmente, das sulfoniluréias. Geralmente, os herbicidas que são degradados pela ação adaptativa da microbiota são menos persistentes que os degradados acidentalmente.

Para alguns herbicidas, a relação de microrganismos que são capazes de degradá-los é extensa; por exemplo, acima de 20 espécies de microrganismos podem degradar o 2,4-D (Devine et al., 1993). Melo et al. (1999) descrevem que fungos foram capazes de crescer na presença do pesticida atrazina em meio líquido de batata-dextrose, mas que somente algumas espécies foram capazes de degradar o composto. Esses autores descrevem que os gêneros *Penicillium* sp., *Eupenicillium* sp., *Dermatiacium* sp. foram identificados como responsáveis pela degradação de atrazina, com crescimento abundante de biomassa.

A degradação dos herbicidas, seja microbiológica ou química, é um importante mecanismo que tende a controlar a persistência, a atividade e a movimentação do pesticida no perfil do solo. A taxa de degradação dos pesticidas no solo, em parte, é função da estrutura da molécula, sendo influenciada pelos fatores de solo e clima, os quais variam de local para local e de ano para ano. Logo, a degradação é dependente de vários fatores ambientais que podem afetar tanto a densidade populacional de microrganismos quanto o seu poder de biodegradação. Por isto, os resultados dos estudos de persistência no campo tendem a ser específicos do local e do ano. Por exemplo, Vicari et al. (1994) verificaram que a meia-vida do chlorsulfuron, aplicado a 30 g ha⁻¹, variou de 51 a 149 dias, dependendo do local de estudo, não se observando evidências de acúmulo do produto pela aplicação repetida do mesmo.

Devido às variações inerentes ao local e ano de condução do experimento, os estudos de degradação são conduzidos em laboratório, onde alguns fatores, como temperatura e umidade do solo, podem ser controlados. Por outro lado, o manejo dos solos e dos experimentos de degradação deve

ser cauteloso, evitando alterações na atividade biológica das amostras, pois a microbiota do solo apresenta papel fundamental na degradação de muitos herbicidas (Walker, 1987).

O manejo dos solos a serem utilizados em experimentos de degradação deve ser mínimo, evitando alterar as características de campo. Práticas como secagem do solo ao ar, congelamento e descongelamento ou armazenamento por longos períodos de tempo devem ser evitadas. Esses fatores alteram drasticamente a atividade bioquímica dos solos, devido à inativação das enzimas extracelulares e a mudanças na densidade e na composição da população microbiológica. Resultados de pesquisa apresentados por Walker (1987) demonstram que a massa da microbiota e a degradação microbiológica de herbicidas foi mais acentuada em amostras frescas do que nas amostras do mesmo solo que tinham sido secadas ao ar e reumedecidas. Além disto, a atividade microbiológica dos solos pode ser alterada devido à passagem das amostras em peneira de malha muito fina. Esse procedimento pode destruir os microagregados do solo e, dependendo da malha utilizada, pode excluir a fração areia grossa do solo. A incubação das amostras em laboratório também pode alterar a atividade microbiológica, devido a alteração na produção e no consumo de CO₂ e oxigênio nos recipientes fechados, o que sugere monitoramento da microbiota durante a incubação.

Um dos principais objetivos dos estudos de degradação dos pesticidas é prever o tempo de permanência do seu resíduo no solo. Para agrupar as comparações quantitativas entre os experimentos de degradação em laboratório, têm-se utilizado dados de estudos de cinética de degradação. Devido a sua simplicidade, os resultados são interpretados utilizando cinética de primeira ordem, na qual a taxa de degradação é diretamente proporcional à concentração:

$$dC/dt = -kC \quad (5)$$

onde C é a concentração após o tempo t e k é a taxa de degradação. Um gráfico do logaritmo da concentração versus o tempo fornece uma reta com a inclinação proporcional à taxa de degradação:

$$\ln C = \ln C_o - kt \quad (6)$$

onde C_o é a concentração inicial. Sendo $t_{1/2}$ o tempo necessário para degradar 50 % da concentração inicial, ou seja, sua meia-vida, a equação anterior fornece:

$$t_{1/2} = 0,693/k \quad (7)$$

O conceito de meia-vida é importante para comparar taxas de degradação em diferentes situações; no entanto, esse parâmetro é considerado uma estimativa simplificada, por causa da natureza complexa do solo e das interações entre os pesticidas e o solo. A meia-vida é uma constante que independe da concentração somente para reações cinéticas de primeira ordem, restringindo seu uso apenas para estas condições. Esse parâmetro é também constante somente quando todas as outras condições experimentais permanecem as mesmas. Deve-se evitar a utilização deste parâmetro em condições de campo, devido às grandes variações obtidas nas taxas de dissipação nestas condições.

Silva et al. (1998), estudando a atividade residual do imazaquin e trifluralin no solo, através de bioensaios com milho, verificou que os resíduos de imazaquin provocaram redução no acúmulo de biomassa da parte aérea do milho, praticamente em todas as doses, até 60 dias após aplicação (DAA). Para as doses acima de 180 g ha^{-1} , o efeito fitotóxico foi observado até 90 DAA. Para as raízes, no entanto, o efeito foi mais prolongado e, somente a partir de 120 DAA, a redução no peso deixou de ser observada. Segundo esses autores, o efeito dos resíduos de trifluralin sobre as plantas de milho manifestou-se de forma mais evidente sobre as raízes do que sobre a parte aérea, com redução no crescimento radicular perceptível até os 150 DAA.

Há enorme número de reações químicas possíveis no complexo ambiente solo. A degradação química pode ocorrer por meio de diversas reações, principalmente oxidação, redução e hidrólise. Em geral, temperaturas elevadas e boa umidade do solo facilitam as reações químicas. Além disto, valores extremos de pH podem resultar no aumento da hidrólise de alguns herbicidas. Muitos pesquisadores acreditam que a hidrólise química seja o principal fator de degradação das triazinas simétricas, por meio da eliminação do átomo de cloro da molécula de triazina. A hidrólise tem sido considerada o principal método de degradação das sulfoniluréias (Smith, 1995). A hidrólise do herbicida flazasulfuron em diferentes valores de pH e temperatura mostrou-se dependente da temperatura e do pH, seguindo modelo de primeira ordem (Oliveira et al., 2005). Segundo estes autores, a meia-vida do herbicida em solução aquosa variou de 0,67 hora a 35°C e pH 3 a 167,4 horas a 25°C e pH 5.

Além da degradação microbiológica e química, a absorção e a metabolização dos produtos pelas plantas daninhas e cultivadas também reduzem os resíduos de herbicidas no solo. Quando absorvidos por plantas resistentes, os herbicidas podem ser armazenados ou metabolizados, mas comumente conjugados com glicosídeos e peptídeos (Shea, 1985). Esse é o metabolismo que as clorotriazinas sofrem em milho, cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), capim-massambará (*Sorghum halepense* L. Pers.) e grama-seda

(*Cynodon dactylon* L. Pers.). No entanto, a conjugação pode não se constituir como método de degradação definitivo, pois herbicidas conjugados podem quebrar hidroliticamente, sendo liberados durante a digestão ou decomposição das plantas (Shea, 1985).

Além dos processos naturais citados acima, a degradação dos herbicidas no solo pode ser acelerada utilizando-se processos que aumentem a atividade microbiana no solo, como adição de matéria orgânica e fertilizantes, manejo do teor de umidade, pH e temperatura do solo, aração profunda e a utilização de microrganismos adaptados (bioremediação).

A adição de matéria orgânica e fertilizantes aumenta a atividade biológica dos solos, aumentando a degradação dos herbicidas. A matéria orgânica também cataliza a degradação não-biológica de herbicidas como as clorotriazinas, por aumentar a fonte de nucleófilos e superfícies ácidas para adsorção hidrolítica. A adição de pequenas quantidades de composto de palha de arroz e fertilizante N-P-K reduz a fase *lag* de degradação do 2,4-D, MCPA e tiobencarb. Por outro lado, a adição de grandes quantidades de composto pode reduzir a degradação, seja pela alta adsorção dos herbicidas ao material orgânico ou devido à abundante fonte de carbono, preferencialmente utilizada pelos microrganismos, em detrimento do resíduo de herbicida (Shea, 1985).

A atividade microbiológica é regulada pelas condições de solo, particularmente conteúdo de água, temperatura e pH. Apesar de as condições requeridas para ótima atividade microbiológica não serem as mesmas para todas as espécies, a atividade de muitos organismos é maior quando o teor de umidade do solo é 50 a 75% da capacidade de campo, temperatura em torno de 25 a 35°C e valores de pH próximos do neutro (Shea, 1985).

Adicionalmente ao efeito do crescimento microbiológico, a modificação do pH pode influenciar a degradação não-biológica dos herbicidas, como, por exemplo, das clorotriazinas, que são degradadas primariamente pela hidrólise. No entanto, aumentos nos valores de pH do solo diminuem a hidrólise, aumentando a persistência destes herbicidas. Como a adsorção das clorotriazinas diminui com o aumento do pH, também aumentam sua disponibilidade e o movimento no solo, aumentando o potencial para maior fitotoxicidade e contaminação de águas subterrâneas. Por outro lado, a adição de fertilizantes na forma ácida, como sulfato ferroso, gesso, nitrato de amônio e matéria orgânica ácida tende a promover a degradação das clorotriazinas no solo (Shea, 1985).

A aração profunda é uma técnica que visa remover o resíduo ativo do herbicida da zona do sistema radicular das plantas. O cultivo tem o efeito de diluir o nível do resíduo no solo, sendo bastante efetivo para os herbicidas de pouca ou nenhuma mobilidade no solo. Cultivos sucessivos podem reduzir o nível de resíduo na superfície do solo, devido ao aumento na degradação não-biológica, como fotodecomposição e volatilização. A aração profunda é mais efetiva particularmente para os herbicidas que agem

na germinação das sementes, especificamente nas raízes e na parte aérea de plântulas, como os tiocarbamatos, acetanilínicos e dinitroanilinas (Shea, 1985). Esse processo de degradação pode ser considerado somente como solução temporária, pois muitos processos de degradação diminuem com a profundidade do solo.

4.4 Volatilização

Volatilização é o processo pelo qual as moléculas dos herbicidas passam do estado líquido para a forma de vapor, podendo se perder para a atmosfera. Esse processo é outra fonte significativa de perda de herbicidas, sendo função da pressão de vapor e das propriedades químicas do produto, como estrutura e peso molecular. Para alguns herbicidas, esse processo pode ser tão intenso que, depois de sua aplicação, há necessidade de imediata incorporação ao solo, para que não se percam substancialmente na forma de vapor para a atmosfera.

Em geral, herbicidas com pressão de vapor maior que 10^{-4} mmHg podem estar sujeitos a perdas por volatilização (Rodrigues & Almeida, 1998). Somado a isto, a menor solubilidade em água pode promover volatilização de compostos com baixos valores de pressão de vapor. Esse processo pode ser intensificado ou reduzido em função, também, da temperatura ambiente, da intensidade dos ventos e do teor de água no solo. Devido às variações nas condições climáticas, é comum encontrar diferentes taxas de volatilização para um mesmo herbicida. Isto também explica as maiores perdas por volatilização de um herbicida em clima tropical, comparado com o temperado.

A elevação da temperatura na superfície do solo intensifica a perda por volatilização dos herbicidas, especialmente quando combinada com alta umidade do solo. Da mesma forma, a intensificação dos ventos sobre a superfície tende a favorecer a volatilização pelo arrastamento dos vapores que se formam, reduzindo, assim, a sua concentração nas camadas mais próximas ao solo.

Herbicidas mais voláteis tendem a persistir menos, apresentando, portanto, menor efeito residual no solo. Por outro lado, elevada volatilização significa escape mais fácil para a atmosfera e, possivelmente, sua transferência para outro meio. De qualquer modo, em geral, um herbicida com elevada pressão de vapor está menos sujeito a causar contaminação no solo do que outro de menor pressão de vapor. Um herbicida volátil, quando incorporado ao solo, pode persistir por mais tempo do que quando deixado na superfície do solo.

A maior volatilização dos herbicidas lipossolúveis aplicados em solo úmido deve-se à ocupação dos sítios de adsorção dos colóides do solo pelas moléculas de água. Isto resulta em mais moléculas de herbicida na solução do solo disponíveis para perdas por volatilização.

Herbicidas do grupo tiocarbamatos, trifluralin e algumas dinitroanilinas estão sujeitos à volatilização. Para esses herbicidas e para os de baixa solubilidade, uma ligeira incorporação após a aplicação reduz as perdas e aumenta sua eficiência.

4.5 Escoamento superficial (*runoff*)

O movimento dos herbicidas na superfície do solo, de áreas tratadas para áreas não tratadas, após chuvas pesadas com a enxurrada, é chamado de *runoff*. Este processo afeta com grande intensidade os herbicidas aplicados diretamente ao solo, mesmo porque esses são, geralmente, aplicados ao solo exposto diretamente às intempéries, antes ou logo após o plantio da cultura (Pires et al., 1995).

O herbicida removido pode estar na solução ou adsorvido às partículas do solo. Portanto, fatores que favorecem a erosão, como, por exemplo, a utilização incorreta do manejo do solo, ocasionam perdas dos herbicidas por escoamento superficial. Além destes fatores, a natureza e a dose das aplicações podem afetar a quantidade do produto removido.

A erosão do solo causa sérios problemas à exploração agropecuária, não só pela elevação dos custos finais de produção, mas também por promover a poluição dos recursos hídricos e a redução da capacidade de armazenamento de reservatórios, devido à sedimentação, à redução do potencial de geração de energia elétrica, à elevação dos custos de tratamento de água, além do aumento dos custos de drenagem dos cursos e reservatórios de água (Silva & Pruski, 1997). Bertoni & Neto (1990) demonstraram que, somente no Brasil, são perdidos, devido à erosão, 600 milhões de toneladas de solo agrícola por ano, o que corresponde a uma perda de nutrientes da ordem de 1,5 bilhão de dólares. Além disto, estudos realizados nos Estados Unidos indicam que 80% do volume do herbicida atrazina aplicado nas lavouras é removido pela enxurrada (Backer & Mickelson, 1994). Esse resultado indica o potencial de contaminação deste processo, pois a maior parte do abastecimento de água nos meios rural e urbano, no Brasil, utiliza águas superficiais.

Um aspecto importante na conservação dos recursos naturais solo e água está relacionado com a proteção da superfície do solo. A cobertura do solo com plantas (cobertura viva) ou com resíduos (cobertura morta) atua como o principal fator de proteção do solo contra o impacto das gotas de chuva. O aumento da porcentagem de cobertura da superfície do solo reduz o tempo para a formação e a velocidade da enxurrada (Carvalho et al., 1990) e, conseqüentemente, a erosão, avaliada pelas perdas de solo e de água (Amado et al., 1989).

O método de preparo do solo é a operação que mais diretamente afeta a sua desagregação e a manutenção ou incorporação de restos vegetais na superfície (Castro et al., 1993). Além disto, o preparo intensivo do solo favorece a formação de camadas compactadas, que, reduzindo a infiltração,

umentam o volume de enxurrada e, por conseguinte, as perdas por erosão, além de reduzir o volume de solo explorado pelas raízes das culturas.

Com o objetivo de reduzir os problemas ambientais oriundos da agricultura intensiva, sobretudo no que diz respeito à erosão, várias práticas conservacionistas têm sido avaliadas. O plantio direto, que consiste na semeadura diretamente sobre a palhada da cultura anterior ou de plantas cultivadas para esse fim, além de plantas daninhas previamente dessecadas, apresenta-se como uma técnica promissora. Esse sistema de cultivo apresenta uma série de vantagens em relação ao sistema convencional, entre as quais a redução dos custos variáveis de produção, a melhoria da qualidade do solo e a possibilidade de reduzir o problema da erosão (Cabezas, 1998; Derpsch, 1997), devido à maior cobertura e ao menor revolvimento do solo.

Os atributos de solo relacionados com a infiltração, com o escoamento superficial, com a retenção e movimento da água e de solutos e a degradação de pesticidas no solo são dinâmicos e fortemente influenciados pelo sistema de manejo (Potter et al., 1995; Derpsch, 1997; Scapini et al., 1998), o que requer o seu monitoramento ao longo do tempo. Quando comparado com o convencional, o plantio direto tem vários efeitos benéficos, entre os quais o aumento da retenção de água (Derpsch et al., 1991), da infiltração (Potter et al., 1995; Gerard et al., 1988; Cassel et al., 1995), da estabilidade de agregados na camada superficial (Derpsch et al., 1991) e a menor temperatura com menores amplitudes devido à cobertura morta do solo (Lal, 1993; Derpsch, 1997). A consequência direta disto é a redução do escoamento superficial e da erosão do solo.

A condutividade hidráulica do solo saturado tende a ser maior no sistema de plantio direto, o que favorece a infiltração de água para a zona das raízes, mas podendo facilitar também a lixiviação de agroquímicos, sobretudo via fluxo preferencial por macroporos e por orifícios abertos pela mesofauna (Derpsch et al., 1991; Singh & Kanwar, 1991). Por isto, a preocupação de alguns autores (Fawcett, 1997; Luchiari Jr. et al., 1997) com o maior risco de contaminação das águas subterrâneas nos sistemas de produção conservacionistas, entre os quais o plantio direto. Todavia, os resultados de pesquisa são ambíguos. Fawcett (1997) afirma que, no sistema de plantio direto, a lixiviação de pesticidas é menor, devido à maior atividade degradante dos microorganismos, à maior adsorção pela matéria orgânica da camada superficial do solo e ao fluxo preferencial, que deixa passar água que não carrega pesticidas. Luchiari Jr. et al. (1997) afirmam que, para algumas moléculas, a lixiviação abaixo da zona das raízes ocorre com maior frequência nos sistemas de produção conservacionistas enquanto Lal (1993) aponta para uma maior incidência de doenças e maior dependência do sistema de plantio direto de agroquímicos. Derpsch et al. (1991) afirmam que a ocorrência de doenças tende a reduzir com o tempo e que a quantidade de pesticidas é a mesma utilizada no sistema convencional (Derpsch et al., 1991; Fawcett, 1997).

Verifica-se que somente conhecendo e entendendo os processos que afetam o comportamento e o destino dos herbicidas no ambiente, pode-se obter maior eficiência de utilização dos produtos, com menor risco de contaminação ambiental.

Referências

- Abernathy, J.R., Relationship of soil mobility and bio-persistence of herbicides to surface and ground water interception. In: *Intensive course on the activity, selectivity, behavior, and fate of herbicides in plants and soils*. West Lafayette, USA: Purdue University, Departments of Horticulture, Agronomy, Botany and Plant Pathology, and Forestry and Natural Resources, p. 508–531, 1994.
- Ahrens, W.H. (Ed.), *Herbicide Handbook*. 7a edição. Champaign, EUA: WSSA, 1994. 352 p.
- Alves, M.E. & Lavorenti, A., Point of zero salt effect: Relationships with clay mineralogy of representative soils of the São Paulo State. *Pedosphere*, 15:545–553, 2005.
- Amado, T.J.C.; Cogo, N.P. & Levien, R., Eficácia relativa do manejo de resíduo cultural de soja na redução das perdas de solo por erosão hídrica. *Rev Bras Cienc Solo*, 13:151–157, 1989.
- Appleby, A.P. & Dawson, J.H., Microbial and non-microbial breakdown of herbicides in soil. In: *Intensive course on the activity, selectivity, behavior, and fate of herbicides in plants and soils*. West Lafayette, USA: Purdue University, Departments of Horticulture, Agronomy, Botany and Plant Pathology, and Forestry and Natural Resources, p. 446–462, 1994.
- Backer, J.L. & Mickelson, S.K., Application technology and best management practices for minimizing herbicide runoff. *Weed Technol*, 8:862–869, 1994.
- Bailey, G.W. & White, J.L., Factors influencing the adsorption, desorption and movement of pesticides in soil. In: *Residue Review, The Triazines Herbicides*. New York, USA: Springer Verlag, v. 32, p. 29–92, 1970.
- Barizon, R.R.M.; Lavorenti, A.; Regitano, J.B.; Prata, F. & Tornisielo, V.L., Simulação do transporte e da sorção de imazaquin em colunas de solo. *Rev Bras Ci Solo*, 30:615–623, 2006.
- Bertoni, J. & Neto, F.L., *Conservação do Solo*. São Paulo, SP: Ícone, 1990. 335 p.
- Beyer, E.M.; Brown, H.M. & Duffy, M.J., Sulfonylurea herbicide soil reactions. In: *Proceedings of British Crop Protection Conference – Weeds*. Pulborough, UK: British Crop Protection Council, v. 2, p. 531–540, 1987.

- Blair, A.M. & Martin, T.D., A review of the activity fate and mode of action of sulfonylurea herbicides. *Pestic Sci*, 22:195-219, 1988.
- Blanco, H.G.; Novo, M.C.S.; Santos, C.A.L. & Chiba, S., Persistência do herbicida metribuzin em solos cultivados com soja. *Pesq Agropec Bras*, 18:1073-1084, 1983.
- Brady, N.C. & Weil, R.R., *The nature and properties of soils*. 11a edição. Upper Saddle River, EUA: Prentice Hall, 1996. 740 p.
- Buser, H.R., Atrazine and other s-triazine herbicides in lakes and in rain in Switzerland. *Environ Sci Technol*, 24:1049-1058, 1990.
- Cabezas, W.A.R.L., Comportamento de adubos nitrogenados em clima e solo de cerrado. *Revista Plantio Direto*, 45:52-60, 1998.
- Carvalho, F.L.C.; Cogo, N.P. & Levien, R., Eficácia relativa de doses e formas de manejo de resíduo cultural de trigo na redução da erosão hídrica do solo. *R Bras Ci Solo*, 14:227-234, 1990.
- Cassel, D.K.; Raczkowski, C.W. & Denton, H.P., Tillage effects on corn production and soil physical conditions. *Soil Sci Soc Am J*, 59:436-1443, 1995.
- Castro, O.M.; Lombardi Neto, F.; De Maria, I.C. & Dechen, S.C.F., Evolução das perdas de solo e água em latossolo roxo cultivado com milho e soja sob diferentes sistemas de preparo. In: *Programas e Resumos do 24º Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*. Goiânia, GO: SBCS, p. 89-90, 1993.
- Derpsch, R., O meio ambiente e o plantio direto. In: Saturnino, H.M. & Landers, J.N. (Eds.), *Agricultura sustentável*. Goiânia, GO: EMBRAPA-SPI, p. 29-48, 1997.
- Derpsch, R.; Roth, C.H.; Sidiras, N. & Kopke, U., Comparação entre diferentes métodos de preparo do solo. In: Derpsch, R.; Roth, C.H.; Sidiras, N. & Kopke, U. (Eds.), *Controle da erosão no Paraná, Brasil: Sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo*. Londrina, PR: IAPAR/Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, p. 71-116, 1991.
- Devine, M.D.; Duke, S.O. & Fedtke, C., *Physiology of Herbicide Action*. Englewood Cliffs, EUA: Prentice-Hall, 1993. 441 p.
- Don Wauchope, D.; Yeh, S.; Linders, J.B.H.J.; Kloskowski, R.; Tanaka, K.; Rubin, B.; Katayama, A.; Kordel, W.; Gerstl, Z.; Lane, M. & Unsworth, J.B., Review: Pesticide soil sorption parameters: theory, measurement, uses, limitations and reliability. *Pest Manag Sci*, 58:419-445, 2002.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, *Normas e Critérios para Levantamentos Pedológicos*. Rio de Janeiro, RJ: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1989. 94 p.

- Fawcett, R.S., Influence of the no-till system on drinkability of water; consequences on water treatment and availability of water. In: *Anais do 2º Seminário Internacional do Sistema Plantio Direto*. Passo Fundo, RS, p. 3–10, 1997.
- Ferreira, J.A.; Martin-Neto, L.; Vaz, C.M.P. & Regitano, J.B., Sorption interactions between imazaquin and a humic acid extracted from a typical brazilian oxisol. *J Environ Qual*, 31:1665–1670, 2002.
- Fontes, M.P.F.; Camargo, O.A. & Sposito, G., Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. *Sci Agr*, 58:627–646, 2001.
- Fruhstorfer, P.; Schneider, R.J.; Weil, L. & Niessener, R., Factors influencing the adsorption of atrazine on montmorillonitic and kaolinitic clays. *Sci Total Environ*, 138:317–328, 1993.
- Gamble, D.S.; Bruccoleri, A.G.; Lindsay, E.; Langford, C.H. & Leys, G.A., Chlorothalonyl in a quartz sand soil: speciation and kinetics. *Environ Sci Technol*, 34:120–124, 2000.
- Gerard, C.J.U.P.; Bordovsky, D.; Gerik, T.; Hons, F. & Matocha, J., Conservation tillage effects on soil physical properties. In: Hons, F. (Ed.), *Conservation Tillage in Texas*. College Station, EUA: Texas Agricultural Experiment Station, p. 84, 1988.
- Gerstl, Z., An update on the K_{oc} concept in regard to regional scale management. *Crop Prot*, 19:643–648, 2000.
- Gonese, J.U. & Weber, J.B., Herbicide rate recommendations: soil parameter equations vs. registered rate recommendations. *Weed Technol*, 12:235–242, 1998.
- Graveel, J.G. & Turco, R.F., Factors affecting mobility of pesticides in soil. In: *Intensive course on the activity, selectivity, behavior, and fate of herbicides in plants and soils*. West Lafayette, EUA: Purdue University, Departments of Horticulture, Agronomy, Botany and Plant Pathology, and Forestry and Natural Resources, p. 464–507, 1994.
- Green, R.E. & Karickhoff, S.W., Sorption estimates for modeling. In: Cheng, H.H. (Ed.), *Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modeling*. Madison, EUA: Soil Science Society of America, p. 79–101, 1990.
- Guimarães, G.L., Impactos ecológicos do uso de herbicidas. In: *Anais do Simpósio: Manejo Integrado de Plantas Daninhas em Hortaliças*. Botucatu, SP: UNESP, p. 121–141, 1992.
- Hassett, J.J. & Banwart, W.L., The sorption of nonpolar organics by soils and sediments. In: Sawhney, B.L. & Brown, K. (Eds.), *Reactions and movement of organic chemicals in soils*. Madison, EUA: Soil Science Society of America, v. 22 de *Special Publication*, p. 31–44, 1989.

- Hatzios, K.K. (Ed.), *Herbicide Handbook*. 7a edição. Lawrence, EUA: WSSA, 1998. P. 102 - supplement.
- Hyun, S. & Lee, L.S., Factors controlling sorption of prosulfuron by variable-charge soils and model sorbents. *J Environ Qual*, 33:1354–1361, 2004.
- Hyun, S.; Lee, L.S. & Rao, P.S.C., Significance of anion exchange in pentachlorophenol sorption by variable-charge soils. *J Environ Qual*, 32:966–976, 2003.
- Inoue, M.H.; Oliveira Jr., R.S.; Regitano, J.B.; Tormenta, C.A.; Constantin, J. & Tornisielo, V.L., Sorption-desorption of atrazine and diuron in soils from southern Brazil. *J Environ Sci Heal B*, 41:605–621, 2006.
- Johnston, C.T.; de Oliveira, M.F.; Teppen, B.J.; Sheng, G. & Boyd, S.A., Spectroscopic study of nitroaromatic-smectite sorption mechanisms. *Environ Sci Technol*, 35:4767–4772, 2001.
- Johnston, C.T.; Sheng, G.; Teppen, B.J.; Boyd, S.A. & de Oliveira, M.F., Spectroscopic study of dinitrophenol herbicide sorption on smectite. *Environ Sci Technol*, 36:5067–5074, 2002.
- Karickhoff, S.W., Semi-empirical estimation of hydrophobic pollutants on natural sediments and soils. *Chemosphere*, 10:833–846, 1981.
- Khakural, B.R.; Robert, P.C. & Koskinen, W.C., Runoff and leaching of alachlor under conventional and soil-specific management. *Soil Use Manage*, 10:158–164, 1994.
- Killeen, S., Development and use of environmental quality standards (EQSs) for priority pesticides. *Pestic Sci*, 49:191–195, 1997.
- Kolpin, D.W.; Kalkhoff, S.J.; Goolsby, D.A.; Sneck-Fahrer, D.A. & Thurman, E.M., Occurrence of selected herbicides and herbicide degradation products in Iowa's ground water. *Ground Water*, 35:679–688, 1997.
- Koskinen, W.C. & Clay, S.A., Factors affecting atrazine fate in North Central U. S. soils. *Rev Environ Contam Toxicol*, 151:117–165, 1997.
- Koskinen, W.C. & Harper, S.S., The retention process: mechanisms. In: Cheng, H.H. (Ed.), *Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modeling*. Madison, EUA: Soil Science Society of America, p. 51–77, 1990.
- Laabs, V.; Amelung, W.; Pinto, A. & Zech, W., Fate of pesticides in tropical soils of Brazil under field conditions. *J Environ Qual*, 31:256–268, 2002.
- Lal, R., Role of no-till farming in sustainable agriculture in the tropics. In: *Anais do Encontro Latino Americano sobre Plantio Direto na Pequena Propriedade*. Ponta Grossa, PR: IAPAR, p. 29–62, 1993.

- Lavorenti, A.; Rocha, A.A.; Prata, F.; Regitano, J.B.; Tornisielo, V.L. & Pinto, O.B., Comportamento do diclosulam em amostras de um latossolo vermelho distroférico sob plantio direto e convencional. *Rev Bras Cienc Solo*, 27:183–190, 2003.
- Lee, L.S.; Rao, P.S.C.; Nkedi-Kizza, P. & Delfino, J.J., Influence of solvent and sorbent characteristics on distribution of pentachlorophenol in octanol-water and soil-water systems. *Environ Sci Technol*, 24:654–661, 1990.
- Leistra, M. & Green, R.E., Efficacy of soil-applied pesticides. In: Cheng, H.H. (Ed.), *Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modeling*. Madison, EUA: Soil Science Society of America, p. 401–428, 1990.
- Luchiar Jr., A.; Toledo, L.G.D. & Ferreira, C.J.A., Influência das atividades agrícolas na qualidade das águas superficiais e subterrâneas. In: *Anais do 2º Seminário Internacional do Sistema Plantio Direto*. Passo Fundo, RS, p. 11–23, 1997.
- Made Anon, W.S.I.; Shiusawa, S.; Sasao, A.; Sakai, K. & Sato, H., Soil parameters maps using real-time soil spectrometer. In: *Proceedings of 5th International Conference on Precision Agriculture*. Madison, EUA: ASA-CSSA-Soil Science Society of America, p. 17, 2000.
- Mangels, G., Behavior of the imidazolinone herbicides in soil – a review of literature. In: Shanner, D.L. & O'Connor, S.L. (Eds.), *The imidazolinone herbicides*. Boca Raton, EUA: CRC PRes, p. 191–209, 1991.
- Martin-Neto, L.; Traghetta, D.G.; Vaz, C.M.P.; Crestana, S. & Sposito, G., On the interaction mechanisms of atrazine and hydroxyatrazine with humic substances. *J Environ Qual*, 30:520–525, 2001.
- Melo, I.S.; Silva, C.M.M.S.; Fay, E.F.; Monteiro, R.R. & Rosamiglia, A.C., *Degradação de atrazina por fungos filamentosos*. Boletim de Pesquisa, EMBRAPA Meio Ambiente, Jaguariúna, SP, 1999. 24 p.
- Oliveira, M.F., *Adsorção, lixiviação e persistência de flumioxazin e metribuzin em diferentes solos*. Dissertação – mestrado em fitotecnia, Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.
- Oliveira, M.F., *Retenção dos herbicidas flazasulfuron e imazaquin em solos de diferentes classes e hidrólise do flazasulfuron em diferentes valores de pH e temperatura*. Tese – doutorado em produção vegetal, Departamento de Fitotecnia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 1998.
- Oliveira, M.F.; Colonna, I.; Prates, H.T.; Mantovani, E.C.; Gomide, R.L. & Oliveira Jr., R.S., Sorção do herbicida imazaquin em latossolo sob plantio direto e convencional. *Pesq Agropec Bras*, 39:787–793, 2004.

- Oliveira, M.F.; Prates, H.T. & Sans, L.M.A., Sorção e hidrólise do herbicida flazasulfuron. *Planta Daninha*, 23:101–113, 2005.
- Oliveira Jr., R.S., *Relação entre propriedades químicas e físicas do solo e sorção, desorção e potencial de lixiviação de herbicidas*. Tese – doutorado em fitotecnia (produção vegetal), Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.
- Oliveira Jr., R.S.; Koskinen, W.C.; Ferreira, F.A.; Khakural, B.R.; Mulla, D.J. & Robert, P.C., Spatial variability of imazethapyr sorption in soil. *Weed Sci*, 47:243–248, 1999.
- Peixoto, M.F.S.P.; Lavorenti, A.; Regitano, J.B.; Tornisielo, V.L.; Peixoto, C.P.; Sampaio, L.S.V. & Peixoto, H.S.V.R., Remobilization of ¹⁴C-atrazine bound residues in fulvic acids. *Cienc Rural*, 35:340–346, 2005.
- Pires, N.M.; Oliveira Jr., R.S.; Paes, J.M.V. & Silva, E., *Avaliação do impacto ambiental causado pelo uso de herbicidas*. Boletim Técnico SIF, Sociedade de Investigações Florestais, Viçosa, MG, 1995. 22 p.
- Potter, K.N.; Torbert, H.A. & Morrison Jr., J.E., Tillage and residue effects on infiltration and sediment losses on vertisols. *Transactions of the ASAE*, 38:1414–1419, 1995.
- Radosevich, S.; Holt, J. & Ghersa, C., *Weed Ecology: implications for management*. 2a edição. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1997. 589 p.
- Rao, P.S.C. & Wagenet, R.J., Spatial variability of pesticides in field soils: methods for data analysis and consequences. *Weed Sci*, 33:18–24, 1985.
- Regitano, J.B.; Koskinen, W.C. & Sadowsky, M.J., Influence of soil aging on sorption and bioavailability of simazine. *J Agric Food Chem*, 54:1373–1379, 2006.
- Reichardt, K., *Dinâmica da matéria orgânica e da energia em ecossistemas*. 2a edição. Piracicaba, SP: USP/ESALQ, 1996. 505 p.
- Resende, M., *Pedologia*. 6a edição. Viçosa, MG: Imprensa Universitária da UFV, 1990. 100 p.
- Ritter, W.F., Pesticide contamination of ground water in the United States – a review. *J Environ Sci Heal B*, 25:1–29, 1990.
- Rodrigues, B.N. & Almeida, F.S., *Guia de Herbicidas*. 4a edição. Londrina, PR: Ed. dos autores, 1998. 647 p.
- Santos, G.A. & Camargo, F.A.O., *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, RS: Genesis, 1999. 508 p.
- Scapini, C.A.; Reinert, D.J.; Silva, V.R. & Zanette, A., Evolução da estabilidade estrutural de solo degradado por dois anos de preparo convencional e plantio direto contínuo. In: *Anais da 12ª Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*. Fortaleza, CE, p. 177–178, 1998.

- Schwarzenbach, R.P.; Gschwend, P.M. & Imboden, D.M., *Environmental organic chemistry*. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1992. 657 p.
- Shea, P.J., Detoxification of herbicide residues in soil. *Weed Sci*, 33:33-41, 1985.
- Silva, A.A.; Oliveira Jr., R.S. & Filho, J.E.C., Avaliação da atividade residual no solo de imazaquin e trifluralin através de bioensaios com milho. *Acta Scientiarum*, 20:291-295, 1998.
- Silva, D.D. & Pruski, F.F., *Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura*. Viçosa, MG: MMA, SRH, ABEAS, UFV, Departamento de Engenharia Agrícola, 1997. 252 p.
- Silva, M.L.N.; Curi, N.; Marques, J.J.G.S.M.; Guilherme, L.R.G. & Lima, J.M., Ponto de efeito salino nulo e suas relações com propriedades mineralógicas e químicas de latossolos brasileiros. *Pesq Agropec Bras*, 31:663-671, 1996.
- Singh, P. & Kanwar, R.S., Preferential solute transport through macropores in large undisturbed saturated soil columns. *J Environ Qual*, 20:295-300, 1991.
- Smith, A.E., Review of analytical methods for sulfonylurea herbicides in soil. *J Environ Anal Chem*, 59:97-106, 1995.
- Stevenson, F.J., *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. New York, EUA: Interscience, 1982. 418 p.
- Vicari, A.; Catizone, P. & Zimdahl, R.L., Persistence and mobility of chlor-sulfuron and metsulfuron under different soil and climatic conditions. *Weed Res*, 34:147-155, 1994.
- Wagenet, R.J. & Rao, P.S.C., Modelling pesticide fate in soils. In: Cheng, H.H. (Ed.), *Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modeling*. Madison, EUA: Soil Science Society of America, p. 351-399, 1990.
- Walker, A., Herbicide persistence in soil. *Rev Weed Sci*, 3:1-17, 1987.
- Werkheiser, W.O. & Anderson, S.J., Effect of soil properties and surfactant on primisulfuron sorption. *J Environ Qual*, 25:809-814, 1996.

Misturas de Herbicidas Contendo Glyphosate: Situação Atual, Perspectivas e Possibilidades

Jamil Constantin e Rubem Silvério de Oliveira Jr.

1. Introdução

O glyphosate é o herbicida mais utilizado e mais estudado em todo o mundo, em função de sua vasta utilização na agricultura. No Brasil, onde a agricultura representa uma das atividades econômicas de maior relevância, sua importância é ampla e indiscutível.

Espera-se, para os próximos anos, um aumento do uso de glyphosate na agricultura do país, entre outros motivos, pela agregação de novas áreas de plantio, pelo aumento de áreas sob plantio direto, pela conversão de áreas de pastagens em cultivos de cana e pela difusão do uso de culturas geneticamente modificadas para resistência ao glyphosate.

Em função da diversidade de culturas e situações nas quais é utilizado, o glyphosate pode ser usado em misturas com outros herbicidas. Com o número de herbicidas registrados para uso no Brasil, o universo de possibilidades de combinações de misturas é quase infinito.

Dada a impossibilidade de prever o comportamento de cada uma das misturas possíveis, este trabalho buscou levantar as informações mais recentes disponíveis na literatura nacional e internacional que apresentassem relevância para o nosso cenário. São abordados aspectos importantes relacionados não só ao controle de plantas daninhas, mas também à seletividade para as culturas, com maior ênfase à soja. A análise das informações disponíveis permitiu a emissão de conclusões relevantes que, embora representem apenas a opinião pessoal dos autores, são subsidiadas pelo corpo do texto.

Espera-se rápido aumento da área cultivada com soja geneticamente modificada para resistência à glyphosate no Brasil. Cultivares resistentes ao glyphosate oferecem aos agricultores a flexibilidade de controlar um amplo espectro de plantas daninhas em soja. Apesar dos custos mais altos associados à aquisição de sementes, os custos associados ao controle de plantas daninhas podem ser diminuídos (Heatherly & Spurlock, 2005).

É interessante mencionar o trabalho de percepção de opiniões elaborado por Culpepper (2006). Vários cientistas da área de Ciência das Plantas Da-

ninhas foram questionados sobre mudanças na composição das infestações de plantas daninhas em áreas de culturas RR. Dados de 2003: no caso do milho RR, este ocupa 15% da área total da cultura; para algodão, é cerca de 90% e para a soja é de 88%. Os dois últimos apresentam tendência de estabilidade com relação à área plantada, ao passo que para o milho a tendência é de rápido aumento da área plantada. Embora não tenham sido observadas mudanças na flora infestante do milho RR, em função do menor tempo de adoção desta tecnologia, estas mudanças já foram observadas para as áreas de soja e algodão.

No caso do algodão RR, *Amaranthus*, *Commelina*, *Ipomoea* e *Cyperus*, assim como gramíneas anuais estão se tornando mais problemáticas. De forma similar ao algodão, espécies de *Ipomoea* e *Commelina* estão se tornando mais problemáticas nas áreas de soja RR. Além disto, em soja RR, várias espécies anuais de inverno como *Amaranthus rudis* e *Amaranthus tuberculatus*, e diversas espécies de *Chenopodium* têm se tornado mais problemáticas.

Cientistas recomendaram as seguintes estratégias para ajudar o manejo das mudanças da composição de plantas daninhas: herbicidas em misturas com glyphosate; rotações de herbicidas com outros herbicidas diferentes do glyphosate; rotação com culturas convencionais (não resistentes ao glyphosate) e maior utilização de herbicidas aplicados ao solo.

2. Misturas de Herbicidas Contendo Glyphosate Visando a Dessecação

Monquero et al. (2004) demonstram que os mecanismos de tolerância de *Commelina benghalensis* ao glyphosate são a absorção diferencial e o metabolismo do herbicida pela planta daninha. Em *Ipomoea grandifolia*, a tolerância ocorre devido à menor translocação do herbicida, não havendo evidências de metabolismo diferencial do herbicida por esta planta daninha. Estes resultados ratificam a idéia de que, para efetivo controle destas plantas daninhas, a associação com outros herbicidas pode ser uma alternativa muito importante.

Uma das táticas utilizadas na redução da interferência inicial das plantas daninhas sobre a cultura da soja tem sido a mistura de produtos com efeito residual aos herbicidas utilizados em manejo. Isto se deve principalmente a dois fatores: o primeiro relacionado ao fato de que o principal fluxo de emergência plantas daninhas concentra-se nos quinze primeiros dias após a emergência da cultura (Pereira et al., 2000); o segundo, à conclusão de que o período anterior à interferência na cultura da soja varia entre 11 e 17 dias após a emergência (Meschede et al., 2002, 2004), o que evidencia a necessidade de um controle efetivo de plantas daninhas neste período inicial do ciclo da cultura.

Gazziero (2003) concluiu que as misturas de glyphosate com diclosulam ou cloransulam são viáveis para o manejo de espécies de difícil controle tais como *Commelina benghalensis*, *Ipomoea grandifolia* e *Euphorbia heterophylla*. No mesmo trabalho, constatou-se que a mistura de glyphosate com carfentrazone também pode ser uma importante alternativa no controle de *Commelina benghalensis* em soja transgênica. Os resultados finais permitiram inferir que o uso de herbicidas utilizados em soja convencional, que apresentem ou não efeito residual, associados ao glyphosate, pode representar uma alternativa ao agricultor na soja geneticamente modificada. No entanto, o estudo destas misturas deve ser aprofundado para que se possa obter os benefícios esperados.

2.1 Misturas envolvendo 2,4-D

Suwunnamek & Parker (1975) estudaram o efeito de glyphosate isolado ou em misturas com outros herbicidas ou com outras substâncias no controle de tiririca. Concluíram que a maioria dos herbicidas tende a apresentar efeitos antagonísticos com glyphosate, especialmente os inibidores da fotossíntese. Por outro lado, o 2,4-D e os aminotriazoles mostraram efeitos aditivos e às vezes sinérgicos. Maior efeito de choque foi obtido com misturas com sulfato de amônio em doses de 1,25 a 10 kg ha⁻¹. Outros compostos que causaram ativação quase igual foram fosfato de amônia, fosfato de butil-amônia e uréia.

Misturas em tanque de glyphosate com dicamba, 2,4-D e bromoxynil reduziram a fitotoxicidade de doses consideradas eficientes para o controle de três espécies (*T. aestivum* – trigo, *Hordeum vulgare* – cevada e *Avena fatua* – aveia silvestre). Com doses crescentes dos herbicidas para controle de espécies de folhas largas (FL) relacionadas com uma dose fixa do glyphosate, houve uma tendência geral em direção ao antagonismo. Aumentos da dose de glyphosate em misturas contendo uma dose fixa de herbicidas para FL superaram o antagonismo. Não houve redução na fitotoxicidade de glyphosate para gramíneas anuais quando o 2,4-D ou bromoxynil foram aspergidos sequencialmente após vários períodos em relação ao glyphosate. Quando gotículas de bromoxynil e glyphosate foram colocadas lado a lado na folha, a fitotoxicidade de glyphosate não foi reduzida, ao passo que quando os dois herbicidas foram misturados em uma única gotícula, considerável redução da fitotoxicidade do glyphosate ocorreu. Estes resultados sugerem que a redução na fitotoxicidade de glyphosate causada pela mistura em tanque com herbicidas como 2,4-D, bromoxynil e dicamba pode ocorrer devido tanto à incompatibilidade física quanto química dentro da mistura, mais do que devido a interações biológicas nas plantas (O'Sullivan & O'Donovan, 1980).

Trabalhos anteriores desenvolvidos por Flint et al. (1988) indicam que a formulação e a dose de 2,4-D também influenciam o grau de antagonismo e a toxicidade do glyphosate para *Sorghum halepense*.

A mistura de glyphosate + 2,4-D foi um dos tratamentos mais eficientes (>95%) no controle de algumas plantas daninhas anuais de inverno importantes no sul dos Estados Unidos, como *Bromus tectorum*, *Aegilops cylindrica* e *Conyza canadensis* (Wiese et al., 1995).

Segundo Stone et al. (2005), a mistura (formulada) de glyphosate+2,4-D foi a única a resolver o problema de infestações de *Convolvulus arvensis* em campos de trigo, tanto pela aplicação da mistura antes do plantio quanto pela aplicação após a colheita, no final do ciclo de plantio.

No Brasil, uma série de trabalhos também têm sido conduzidos com o objetivo de estudar o comportamento de misturas contendo 2,4-D.

A losna (*Artemisia verlotorum*) é uma planta daninha com alta capacidade de rebrota de seus rizomas e tolerante à maioria dos herbicidas, principalmente os de contato, o que dificulta consideravelmente o seu controle químico e mecânico. Áreas naturalmente infestadas com esta planta foram tratadas com glyphosate e 2,4-D, em diferentes doses combinadas entre si, por Brighenti et al. (1994). O glyphosate foi mais eficiente que o 2,4-D. O 2,4-D não apresentou efeito sobre a losna aos 90 dias após sua aplicação. O glyphosate apresentou efeito mais prolongado que o 2,4-D, reduzindo o número de plantas vivas até os 90 dias após sua aplicação e as doses intermediárias proporcionaram um controle mais eficiente da losna em detrimento do uso de doses mais elevadas. Os valores máximos alcançados pelas características avaliadas na cultura do trigo coincidiram com a aplicação de doses intermediárias, que proporcionaram o melhor controle da losna. Maior rendimento do trigo (3787 kg ha⁻¹) foi obtido quando se efetuou a aplicação da mistura de 0,721 kg ha⁻¹ de glyphosate com 1,152 kg ha⁻¹ de 2,4-D.

Um dos herbicidas mais utilizados para o controle de plantas daninhas em pós-emergência nos pomares cítricos paulistas é o glyphosate. No entanto, este herbicida aplicado isoladamente e nas doses recomendadas, tem proporcionado seleção de *Commelina virginica*, devido à grande tolerância da mesma, somada à eficiente eliminação das demais espécies da comunidade infestante. Pesquisa realizada por Ramos & Durigan (1996) em pomares de citros da região de Catanduva, SP, demonstrou que este problema pode ser solucionado com aplicações de misturas prontas de glyphosate+2,4-D. Assim, a análise dos resultados obtidos mostrou que a mistura pronta de glyphosate + 2,4-D apresenta um controle superior da trapoeraba em relação aos produtos aplicados isoladamente, não havendo diferenças significativas no controle para doses superiores a 0,60 + 0,80 kg i.a. ha⁻¹. Os dados obtidos reforçam a teoria de sinergismo entre os dois produtos. Em nenhum dos tratamentos foram verificados sintomas visuais de intoxicação nas laranjeiras.

Para avaliar doses do glyphosate, isolado ou misturado com 2,4-D, na dessecação de campo nativo para semeadura direta de aveia, Ferri & Eltz

(1998) conduziram, durante o ano de 1996, um experimento em Santa Maria, RS. Foram avaliados os seguintes tratamentos: glyphosate a 720, 1080, 1440 e 1800 g ha⁻¹ de equivalente ácido, isolado ou misturado com 320 g ha⁻¹ de 2,4-D éster, aspergidos no volume de calda de 100 L ha⁻¹, além de testemunha sem controle. Observaram que a adição do 2,4-D ao glyphosate não prejudicou nem melhorou o controle de *Paspalum maculosum*, *Paspalum plicatulum*, *Paspalum nicorae*, *Paspalum notatum* var. *notatum* biótipo "A", *Paspalum pumilum* e *Vernonia nudiflora* pelo glyphosate.

Ramos & Durigan (1998) também observaram que a mistura de 2,4-D ao glyphosate não afetou a eficiência deste herbicida.

Oliveira et al. (2002) constataram que a adição de glyphosate ou diuron a doses crescentes de 2,4-D aumentou o controle de *Commelina benghalensis* e *Triopogandra diuretica*, sendo que o mesmo não aconteceu para *Commelina erecta*, para a qual o 2,4-D isolado proporcionou 100% de mortalidade das plantas.

Santos et al. (2002) avaliaram tratamentos com glyphosate e 2,4-D, aplicados isolados ou em mistura em tanque. Concluíram que, embora a eficiência individual dos produtos seja maior para o 2,4-D, a mistura entre ambos é superior a qualquer um dos herbicidas utilizados isoladamente. Em *C. benghalensis*, 2,4-D proporcionou controle excelente (>91%) a partir de 167,5 g ha⁻¹ na presença de glyphosate e a partir de 335 g ha⁻¹ na ausência de glyphosate. Em *C. diffusa*, 2,4-D proporcionou controle excelente a partir de 670 g ha⁻¹, tanto na presença quanto na ausência de glyphosate. No entanto, somente a mistura de 2,4-D+glyphosate a 1005 + 720 g ha⁻¹ provocou 100% de controle desta espécie, verificando-se rebrota das plantas nos outros tratamentos. Nas condições dos experimentos, *C. benghalensis* mostrou-se mais suscetível que *C. diffusa* ao herbicida 2,4-D aplicado isoladamente ou em mistura com o glyphosate.

No trabalho conduzido por Bueno et al. (2006), verificou-se que as dessecações antecedendo o plantio da soja RR foram mais eficientes no controle de *Commelina benghalensis* quando se realizou a mistura de glyphosate com 2,4-D, a qual foi superior às misturas de glyphosate com flumioxazin ou chlorimuron. Aliando-se dessecação e efeito residual, o melhor controle de *C. benghalensis* ocorreu no tratamento onde se adicionou diclosulam no momento da realização da dessecação pré-plantio.

Em trabalho semelhante conduzido por Nonino et al. (2006), observou-se o mesmo resultado no controle de *C. benghalensis* quando da mistura de glyphosate+2,4-D+diclosulam, sendo que o controle de *Ipomoea spp.*, *Euphorbia heterophylla*, *Tridax procumbens*, *Richardia brasiliensis*, *Rhynchelistrum repens*, *Boerhaavia diffusa* e *Bidens pilosa* também foram melhorados.

A eficiência da mistura de glyphosate+2,4-D foi considerada elevada no controle de *C. benghalensis* no trabalho de Fernandes et al. (2006) de dessecação antecedendo a semeadura direta da soja.

2.2 Misturas envolvendo metsulfuron e imazapyr

Kudsk & Mathiassen (2003) estudaram o efeito de 73 combinações possíveis de misturas de glyphosate, glufosinate, metsulfuron e imazapyr, sobre o controle de *Sinapsis arvensis* e *S. alba*. As misturas de glyphosate+imazapyr e glyphosate+metsulfuron apresentaram tendência de sinergismo pelo modelo aditivo. O sinergismo foi mais pronunciado com produtos comerciais do que com o glyphosate técnico, sugerindo que a presença de constituintes da formulação comercial do glyphosate seriam os responsáveis pelos efeitos sinérgicos.

Por outro lado, na mesma cultura, no Brasil, Alcântara & Silva (2002) constataram que as misturas de metsulfuron com glyphosate ampliaram o espectro de controle do glyphosate em pós-emergência e apresentaram efeito residual.

2.3 Misturas envolvendo carfentrazone, flumioxazin e butafenacil

Em relação aos herbicidas carfentrazone e flumioxazin, grande parte da informação disponível está relacionada a trabalhos desenvolvidos no Brasil, principalmente em função da eficácia que estes produtos apresentam para o controle de espécies importantes do complexo de plantas daninhas das nossas culturas, como *Ipomoea grandifolia*, *Commelina spp.*, *Alternanthera tenella*, *Richardia brasiliensis*, *Tridax procumbens* e *Spermacoce latifolia*.

Ronchi et al. (2002a) desenvolveram pesquisa que teve como objetivo avaliar a eficácia do herbicida carfentrazone-ethyl, isolado ou associado ao glyphosate e ao glyphosate potássico, no controle de duas espécies de plantas daninhas conhecidas como trapoeraba: *Commelina diffusa* e *Commelina benghalensis*. Concluíram que a *C. diffusa* foi mais tolerante do que *C. benghalensis* ao carfentrazone-ethyl e às suas misturas com glyphosate e glyphosate potássico. As diferentes formulações de glyphosate promoveram controle ruim (inferior a 30%) de ambas as espécies de trapoeraba, tendo a adição de carfentrazone-ethyl em mistura em tanque melhorado substancialmente o controle destas infestantes.

Outro experimento (Ronchi et al., 2002b) foi conduzido com o objetivo de avaliar a eficiência de misturas de herbicidas no controle de duas espécies de trapoeraba, *Commelina diffusa* e *Commelina benghalensis*. Os resultados demonstraram que os tratamentos mais eficientes no controle das trapoerabas foram as aplicações sequenciais, com intervalo de 21 dias, de (paraquat + diuron) / (carfentrazone-ethyl+glyphosate) e de (paraquat+diuron) / (paraquat+diuron), seguidas das misturas em tanque de 2,4-D + glyphosate e de carfentrazone-ethyl + glyphosate e/ou glyphosate potássico.

Também Matallo et al. (2002) verificaram que a mistura glyphosate+flumioxazin foi mais eficiente no controle de *Commelina benghalensis*, *Ipomoea grandifolia*, *Richardia brasiliensis* e *Sida rhombifolia* do que o

glyphosate isolado quando foram simulados diferentes intervalos de molhamento após a aplicação dos tratamentos. Assim, precipitações ocorridas até quatro horas após a aplicação do glyphosate isolado comprometeram a eficiência deste tratamento, enquanto que nas misturas em tanque com flumioxazin, chuvas a partir de uma hora após a aplicação não afetaram a eficiência no controle das plantas daninhas.

Costa et al. (2002) demonstraram que as espécies *Commelina benghalensis*, *Euphorbia heterophylla*, *Ipomoea grandifolia*, *Panicum maximum*, *Richardia brasiliensis* e *Sida rhombifolia* foram controladas com eficiência pelo flumioxazin em todas as doses quando em mistura com glyphosate. O glyphosate aplicado isoladamente como padrão somente não controlou com eficiência a *Commelina benghalensis*. Verificou-se, para todas as espécies, que a associação de flumioxazin ao glyphosate acelerou o aparecimento de sintomas de intoxicação, propiciando índices de controle superiores a 82% já aos 8 DAA.

O herbicida butafenacil propiciou melhoria no desempenho do glyphosate potássico para o controle de *Commelina benghalensis*. O mesmo aconteceu quando misturou-se glyphosate potássico ao carfentrazone-ethyl (Souza et al., 2002).

Em avaliações de misturas para dessecação pré-semeadura da soja, constatou-se que *Cenchrus echinatus*, *Euphorbia heterophylla*, *Sida rhombifolia* e *Leonotis nepetifolia* foram eficientemente controladas por misturas triplas de flumioxazin+diclosulam+glyphosate e pelas misturas duplas de flumioxazin+glyphosate e diclosulam+glyphosate e glyphosate aplicado isolado, sugerindo que tais misturas não apresentam nenhum efeito antagônico para o controle destas plantas daninhas (Carvalho et al., 2002).

Estudando misturas de glyphosate com flumioxazin ou 2,4-D visando a dessecação antes do plantio direto da soja, Rezende & Alcântara (2002) concluíram que *Brachiaria plantaginea* foi eficientemente controlada pela aplicação de glyphosate isolado ou em mistura com flumioxazin. *Ipomoea purpurea*, *Ageratum conyzoides*, *Richardia brasiliensis* e *Bidens pilosa* foram controladas em nível satisfatório com a aplicação de flumioxazin e glyphosate isoladamente. Quando em mistura com glyphosate, o flumioxazin apresentou maior eficiência do que quando aplicado isoladamente, fato também constatado com a aplicação de glyphosate+2,4-D.

Trabalhando em condições controladas para determinar a interação do carfentrazone-ethyl em mistura em tanque com o herbicida glyphosate, no controle de seis espécies de plantas daninhas, Werlang & Silva (2002) concluíram que glyphosate aplicado isoladamente na dose de 720 g ha⁻¹ foi eficaz no controle de *Amaranthus hybridus* (100%), *Desmodium tortuosum* (100%), *Bidens pilosa* (99%), *Eleusine indica* (96%), *Digitaria horizontalis* (100%) e *Commelina benghalensis* (93%) aos 21 DAA. Carfentrazone-ethyl aplicado isoladamente controlou eficazmente *C. benghalensis*. As misturas de glyphosate nas doses de 252 e 720 g ha⁻¹ com carfentrazone-ethyl nas

doses de 15 e 30 g ha⁻¹ demonstraram efeito aditivo no controle de *A. hybridus*, *D. tortuosum* e *Bidens pilosa*, à exceção das misturas de glyphosate na dose de 252 g ha⁻¹ com as doses de 15 e 30 g ha⁻¹ de carfentrazone-ethyl, que proporcionam efeito sinérgico no controle de *D. tortuosum*. A adição das duas doses de carfentrazone-ethyl antagonizou o efeito de glyphosate na menor dose (252 g ha⁻¹) no controle de *E. indica*, apresentando, no entanto, efeito aditivo com o glyphosate na maior dose (720 g ha⁻¹). Para *D. horizontalis*, as misturas de carfentrazone-ethyl com glyphosate na menor dose (252 g ha⁻¹) apresentaram efeito sinérgico no controle desta espécie, demonstrando, ainda, efeito aditivo na mistura com glyphosate na dose de 720 g ha⁻¹. A mistura de carfentrazone-ethyl com glyphosate proporcionou efeito aditivo no controle de *C. benghalensis*, independentemente das combinações de doses avaliadas. Os resultados deste experimento indicam que carfentrazone-ethyl apresenta comportamento diferenciado quanto à interação com glyphosate, dependendo da espécie de planta daninha e da dose dos herbicidas utilizados na mistura em tanque, sendo complementar na mistura em tanque com glyphosate, pois demonstrou efeito antagônico em poucas das combinações estudadas, prevalecendo seu efeito aditivo na mistura com glyphosate, no controle das espécies avaliadas.

Estudos desenvolvidos em Maringá, PR por Jaremtchuck et al. (2008) tiveram por objetivo verificar se as misturas de glyphosate+flumioxazin poderiam promover dessecação mais rápida de áreas com grande cobertura vegetal (predominantemente composta por *Parthenium hysterophorus*). Este fato é de extrema importância para o desenvolvimento inicial e para a produtividade da soja. Este experimento consistiu de dessecações realizadas em diferentes períodos de tempo antecedendo a semeadura direta da soja. A adição de flumioxazin ao glyphosate, independente da dose, nas diferentes épocas de manejo (dessecação), acelerou a dessecação das plantas daninhas avaliadas no experimento. No sistema de manejo Aplique-Plante e 3 DAS (dias antes da semeadura), a aceleração ocorreu até 10 DDS (dias depois da semeadura). Para diferentes épocas de manejo, a associação de glyphosate+flumioxazin proporcionou um efeito residual que possibilitou a redução do número de plantas daninhas, facilitando o controle após a emergência da soja. Estes dados demonstram a ocorrência do efeito residual do herbicida, que proporciona o controle de plantas daninhas no início do ciclo da cultura. Neste trabalho, apenas as épocas de manejo Aplique-Plante e 3 DAS com glyphosate isolado afetaram a produtividade, reduzindo os rendimentos da soja em 16 e 18%, respectivamente, em relação às suas respectivas testemunhas. A associação de glyphosate com flumioxazin, por propiciar a aceleração da morte da cobertura vegetal, permitiu a semeadura em um curto espaço de tempo após a dessecação, o que pode levar à diminuição das perdas de produtividade da cultura, pois esta tem o seu desenvolvimento inicial numa condição mais favorável. Trabalhos semelhantes conduzidos em outros locais do Brasil (Luis Eduardo Magalhães,

BA, Rio Verde, GO e Ponta Grossa, PR) (Constantin et al., 2005), com diferentes tipos de infestações de plantas daninhas (*Brachiaria plantaginea*, *Alternanthera tenella*) chegaram a conclusões semelhantes, isto é, a aceleração da morte das plantas daninhas pelas misturas de flumioxazin com glyphosate somada ao efeito residual de controle sobre o fluxo inicial de plantas daninhas foi benéfica para o desenvolvimento e a produtividade da soja.

2.4 Misturas envolvendo inibidores do fotossistema II e acetochlor

Bradley et al. (2000) ao estudarem o antagonismo entre atrazine e glyphosate para *Sorghum bicolor* buscaram saber se a adição de sulfato de amônio poderia minimizar tal antagonismo. Os resultados que obtiveram pela equação de Colby para sinergismo indicaram que o atrazine não antagonizou o controle do sorgo forrageiro pelo glyphosate. Os autores concluíram que o efeito antagonístico observado em condições de campo com temperaturas mais baixas não se repetiam em casa de vegetação pela temperatura controlada destas condições.

Com o objetivo de se avaliar a eficiência das misturas de glyphosate com diuron ou simazine para o controle de plantas daninhas anuais na cultura de citrus, Galli & Carvalho (1985) conduziram dois experimentos durante o ano agrícola 83/84, sendo um em Jaguariúna e outro em Catanduva, ambos no estado de São Paulo. As misturas de herbicidas com atividade residual com glyphosate proporcionaram melhor controle das plantas daninhas (*Brachiaria plantaginea*, *Digitaria horizontalis* e *Portulaca oleracea*) aos 60 DAT quando comparados às aplicações de glyphosate isoladamente.

O objetivo do trabalho de Rodrigues et al. (2000) foi estudar o comportamento dos herbicidas com atividade residual atrazine e acetochlor em mistura com dessecantes no manejo em plantio direto. Os resultados mostraram que o controle de *Brachiaria plantaginea*, *Euphorbia heterophylla* e *Bidens pilosa* foi mais bem efetuado com os tratamentos onde havia atrazine, inclusive onde ele foi utilizado em mistura em tanque com glyphosate.

Vidal et al. (2003) avaliaram os seguintes tratamentos: glyphosate nas doses de 540, 720 e 900 g ha⁻¹, aplicado isoladamente ou associado à mistura formulada de [simazine+atrazine] nas doses de [1750+1750] g ha⁻¹. Também foram testados um tratamento sem herbicidas e outro apenas com o herbicida residual. As avaliações de controle e de teores de clorofila indicaram efeitos antagônicos para as três doses de glyphosate. Os efeitos antagônicos da associação dos herbicidas apresentam redução de intensidade com o aumento da dose do glyphosate ou com o decorrer do tempo.

2.5 Misturas contendo herbicidas com atividade residual no solo

A mistura em tanque de glyphosate com dimethenamid em dessecação de manejo em soja RR mostrou que dimethenamid não foi antagonístico ao glyphosate nas doses avaliadas (560 a 1680 g e.a. ha⁻¹). O controle na

dessecação de manejo antecedendo o plantio foi 98% para *Conyza canadensis* e 82% para *Rumex crispus* com ou sem dimethenamid. No entanto, todas as misturas de glyphosate+dimethenamid propiciaram controle residual de fluxos de *Brachiaria platyphylla* que emergiram após a operação de dessecação, com um nível de controle de 84 a 96%. Em pós-emergência, glyphosate isolado propiciou controle 89% de *Echinochloa crusgalli* e de *Sorghum halepense*, mas as misturas em tanque com dimethenamid controlaram também fluxos tardios de *E. crusgalli* em função da atividade residual do dimethenamid. A aplicação de dimethenamid junto com o glyphosate melhorou a produtividade da soja em 500 kg ha⁻¹ (Scott et al., 1998). Este trabalho demonstrou que a utilização de um herbicida residual como o dimethenamid pode ser de interesse, pois mesmo não aumentando o controle em pós-emergência do glyphosate, contribuiu no controle mais efetivo das plantas daninhas em função do efeito residual, o que, nesse caso, permitiu uma maior produtividade da cultura.

É certo que a aplicação de doses sequenciais mais baixas de glyphosate ou em misturas em tanque com herbicidas com atividade residual pode aumentar o controle residual durante todo o ciclo da cultura. No entanto, considerando que a estimativa de custo de uma aplicação comercial em Wisconsin (EUA) é de U\$16,00 por hectare (Boerboom et al., 1999), Corrigan & Harvey (2000) consideram que herbicidas com atividade residual só serão economicamente viáveis se eles puderem ser aplicados combinados com outras aplicações de herbicidas, como na dessecação ou em aplicações em PÓS em soja RR.

Dentro desta premissa, Corrigan & Harvey (2000) conduziram dois trabalhos de campo visando avaliar misturas contendo glyphosate. No primeiro experimento, aplicou-se glyphosate, 2,4-D e a mistura (na dessecação) e sete dias depois aplicou-se os tratamentos herbicidas em PRÉ (clomazone, glyphosate+pendimethalin, 2,4-D+pendimethalin, 2,4-D+chlorimuron+metribuzin, todas complementadas posteriormente com glyphosate em pós-emergência precoce (estádio V2 da soja) e PÓS (V4), em duas doses (420 e 630 g ha⁻¹). No segundo experimento, glyphosate aplicado sete dias após o plantio e depois foram avaliados 25 tratamentos, os quais foram constituídos por cinco tratamentos com glyphosate (nenhum tratamento, glyphosate isolado em PÓS precoce e glyphosate em PÓS, ambos em duas doses) combinados com cinco tratamentos com herbicidas com atividade residual (nenhum, dimethenamid, [chlorimuron+thifensulfuron], cloransulam e imazethapyr).

Concluiu-se que a mistura de herbicidas com atividade residual com glyphosate em qualquer tratamento em PÓS não aumentou a produtividade nem o controle de plantas daninhas. Os herbicidas com atividade residual não tiveram efeito ou reduziram a produtividade. Glyphosate aplicado sozinho em PÓS_p ou PÓS foi igual ou mais efetivo do que a combinação de glyphosate com qualquer dos herbicidas com atividade residual

deste trabalho. Concluíram também que o uso de herbicidas com atividade residual na dessecação pode ser benéfico quando a competição precoce reduzir a produtividade da soja ou se a mistura com glyphosate tiver que ser aplicada mais tarde por causa de condições atmosféricas adversas ou por falta de equipamento disponível, condições as quais não foram observadas nestes experimentos (Corrigan & Harvey, 2000).

A aplicação de glyphosate na dessecação antes do plantio não afetou a eficiência de aplicações em pós-emergência, tanto do glyphosate isolado quanto em mistura. Em aplicações em pós-emergência, glyphosate isolado ou em mistura tripla em tanque com clomazone e imazethapyr promoveu excelente controle de *Conyza canadensis* e *Panicum dichotomiflorum*, independente do estágio da soja na aplicação, o que evidencia que não houve antagonismo. Geralmente, em aplicações em PÓS o glyphosate sozinho foi mais efetivo quando aplicado entre os estádios V2 e V6 da soja (16 a 35 DAP). No entanto, a mistura em tanque de glyphosate ($0,8 \text{ kg ha}^{-1}$) com clomazone ($0,6 \text{ kg ha}^{-1}$) e imazethapyr ($0,07 \text{ kg ha}^{-1}$) estendeu a janela de aplicação inclusive para fases mais precoces do ciclo da soja RR (*cracking* e V1), em função do efeito residual dos herbicidas acrescentados ao glyphosate. Com relação à seletividade, todos os tratamentos herbicidas foram seletivos para a soja RR em todos os estádios de aplicação até o V6 (Vangessel et al., 2001).

Nas condições brasileiras, o uso de mistura de herbicidas tem crescido na condução das lavouras, principalmente na dessecação da cobertura vegetal para semeadura direta da soja. A associação de herbicidas que possuam efeito residual no solo ao glyphosate por ocasião da operação de manejo (dessecação pré-plantio) pode ser uma alternativa para reduzir a infestação de plantas daninhas na cultura a ser implantada (Carvalho et al., 2000; Valente & Cavazzana, 2000; Roman, 2002; Carvalho et al., 2001), e, conseqüentemente, proporcionar economia nos custos de controle das plantas daninhas (Price et al., 2002; Roman, 2002).

Alves & Guimarães (2002), por exemplo, verificaram que as misturas de glyphosate com sulfentrazone, carfentrazone ou flumioxazin foram eficientes no controle de *Commelina benghalensis* em aplicações dirigidas às entrelinhas da cultura do cafeeiro, sendo que as misturas com sulfentrazone apresentaram efeito mais prolongado.

Em outro trabalho, Bizzi & Andres (2002) verificaram que a mistura de chlorimuron-ethyl+glyphosate apresentou controle superior na dessecação de *Richardia brasiliensis* e *Sida rhombifolia* em comparação ao glyphosate isolado, e ainda que chlorimuron-ethyl e diclosulam utilizados na dessecação pré-plantio da soja apresentaram efeito residual para *Bidens pilosa* e *Sida rhombifolia* e não afetaram a cultura implantada posteriormente.

Carreira et al. (2002) analisaram a viabilidade de diferentes misturas entre glyphosate, flumioxazin, diclosulam, chlorimuron-ethyl e imazaquin

e constataram que as diferentes combinações de misturas e glyphosate isolado apresentaram excelentes resultados de controle para *Sida rhombifolia* e *Euphorbia heterophylla*. No caso de *Commelina benghalensis* os resultados foram satisfatórios, porém inferiores aos obtidos para as outras plantas daninhas. Nas misturas, o controle inicial foi mais rápido em comparação ao glyphosate isolado. Desta forma, todos os tratamentos foram eficientes para o manejo das plantas daninhas avaliadas, sendo que nas misturas também ocorreu efeito residual para *Sida rhombifolia* e *Euphorbia heterophylla* durante o ciclo da soja.

Bizzi et al. (2002) ao estudarem sistemas de manejo pré-plantio para a cultura da soja, constataram que as misturas em tanque de glyphosate+chlorimuron-ethyl ou glyphosate+diclosulam foram eficientes na dessecação de *Bidens pilosa* e propiciaram efeito residual suficiente para controlar a planta daninha durante todo o ciclo da soja.

Cobucci et al. (2004) observaram que quando as dessecações de pré-plantio do feijoeiro foram realizadas com misturas em tanque entre sulfosate e vários herbicidas com atividade residual, ocorreu uma redução no uso de herbicidas utilizados após a emergência do feijão, o que torna esta tecnologia economicamente viável.

Timossi & Durigan (2006) conduziram trabalho com o objetivo de estudar opções de manejo da cana-de-açúcar para a implantação da soja em sistema de plantio direto logo após a eliminação da soqueira da cana. Concluíram que a mistura em tanque de glyphosate+diclosulam, além de não afetar a eficácia do glyphosate na eliminação da soqueira, ainda promoveu efeito residual para a cultura da soja plantada a seguir, proporcionando um bom controle de convulváceas.

Com o objetivo de avaliar a influência do momento de aplicação do herbicida glyphosate e do uso de clomazone na dessecação pré-semeadura sobre a eficácia de controle de plantas daninhas na cultura da soja tolerante ao glyphosate, Rossin et al. (2006) instalaram experimento em Piracicaba, SP. Os melhores resultados foram obtidos com a associação da aplicação de glyphosate+clomazone na dessecação e uma intervenção com glyphosate em pós-emergência no estágio fenológico V4 da soja. Concluiu-se que a aplicação de um herbicida com efeito residual, em associação com glyphosate, na operação de dessecação pré-semeadura, pode reduzir o número ou retardar as aplicações posteriores de glyphosate sobre a cultura da soja geneticamente modificada.

Menezes et al. (2006), ao conduzirem trabalhos para verificar a eficácia de misturas de glyphosate com imazethapyr e chlorimuron-ethyl em aplicações de pré-semeadura da cultura da soja, concluíram que a adição dos herbicidas imazethapyr e chlorimuron-ethyl junto ao glyphosate não melhorou o controle e também não diminuiu a rebrota posterior das plantas daninhas *Digitaria insularis*, *Tridax procumbens* e *Leptochloa filiformis*. Três dias antes da semeadura da soja foi o intervalo mínimo para que o controle

das três espécies de plantas daninhas não fosse prejudicado pela operação de semeadura mecânica. Constatou-se que os tratamentos herbicidas não afetaram o número de plantas emergidas das espécies *Sida santaremnensis*, *D. insularis*, *Eleusine indica*, *Chamaesyce hirta*, *Bidens pilosa* e *Senna obtusifolia*. Apenas para a espécie *Alternanthera tenella* foi verificado que a adição de imazethapyr ou de chlorimuron-ethyl junto ao glyphosate reduziu a emergência desta planta daninha na área. Um incremento dos herbicidas imazethapyr e chlorimuron-ethyl nas doses adicionadas ao glyphosate não resultou em aumento da produtividade da soja.

Zagonel (2006) verificou que misturas de glyphosate+2,4-D tiveram fitotoxicidade aceitável nas aplicações próximas à semeadura da soja geneticamente modificada. Concluiu que a aplicações de glyphosate isoladas ou complementadas com 2,4-D, diclosulam, chlorimuron-ethyl e flumioxazin em mistura em tanque foram eficientes no controle das plantas daninhas na dessecação. Contudo, observa que o uso do diclosulam na dessecação resultou em melhor controle das plantas daninhas após a emergência da soja, mantendo a área com menor infestação no momento da aplicação de pós-emergência.

Cavenaghi et al. (2006) avaliando a eficiência de diferentes programas de manejo de plantas daninhas antecedendo o plantio de soja transgênica. Concluíram que a associação de herbicidas com atividade residual (chlorimuron-ethyl, flumioxazin e diclosulam) ao glyphosate reduziu o fluxo de novas plantas daninhas, o que pode ocasionar redução na interferência em relação à cultura.

Tofoli et al. (2006) concluíram que a mistura de glyphosate+2,4-D+diclosulam na dessecação pré-plantio foi eficiente no controle de *Tridax procumbens*, *Ageratum conyzoides* e *Brachiaria plantaginea* e evidenciam que a aplicação de diclosulam a 30 g ha⁻¹ com glyphosate é uma alternativa para evitar a matocompetição inicial das plantas daninhas com soja geneticamente modificada para resistência ao glyphosate.

Já Ribeiro et al. (2006) destacam que a adição de 2,4-D amina ao glyphosate no tratamento de dessecação (para plantio de soja RR) é fundamental para obter controle comercial da trapoeraba e que a adição de diclosulam na dessecação contribuiu para eliminar a competição inicial em função do efeito residual, além de promover 100% de controle de erva-quente proveniente de sementeira.

Werlang (2006a) em trabalhos de manejo de plantas daninhas antecedendo a semeadura direta da soja transgênica conclui que as misturas de carfentrazone+glyphosate proporcionaram maior velocidade de dessecação de *Commelina benghalensis*, *Ipomoea grandifolia*, *Tridax procumbens* e *Sida rhombifolia*. A mistura de sulfentrazone+glyphosate proporcionou bom controle residual de *C. benghalensis*, *I. grandifolia*, *Cenchrus echinatus*, *Digitaria horizontalis*, *T. procumbens*, *Sida rhombifolia* e *Bidens*

pilosa até 20 dias após a emergência da cultura, proporcionando a eliminação de uma aplicação de glyphosate no manejo de plantas daninhas na soja transgênica.

Em outro trabalho Werlang (2006b), com as mesmas misturas testadas para a dessecação antecedendo plantio da soja transgênica concluiu que as misturas de carfentrazone e sulfentrazone com glyphosate proporcionaram maior velocidade de dessecação de *C. benghalensis*, *I. grandifolia* e *E. heterophylla*, *Senna obtusifolia* e *Sida rhombifolia*. A mistura de sulfentrazone+glyphosate proporcionou efeito residual que resultou no controle de *C. benghalensis*, *I. grandifolia*, *Eleusine indica*, *E. heterophylla*, *Senna obtusifolia*, *Digitaria horizontalis*, *Sida rhombifolia* e *Bidens pilosa* por um período de 15 dias após a emergência da cultura, o que permitiu a eliminação de uma aplicação de glyphosate no manejo de plantas daninhas na soja transgênica.

Osipe et al. (2006) verificaram que a utilização da mistura formulada [glyphosate+imazethapyr] na dessecação antecedendo o plantio da soja foi eficiente no controle de *E. heterophylla* e *B. pilosa* e proporcionou um controle satisfatório das invasoras até 42 DAA, não necessitando de aplicação complementar.

Buzatti & Gazziero (2006) concluem que dessecações para o plantio da soja RR envolvendo misturas de 2,4-D, glyphosate e diclosulam praticamente eliminaram a reinfestação por plantas daninhas, o que facilitou o desempenho do glyphosate no controle de pós-emergência.

2.6 Misturas visando o controle de biótipos resistentes e diferentes espécies de *Commelina*

Estudando o controle de diferentes espécies do gênero *Commelina*, Penczkowski & Rocha (2006) concluíram que aplicações de glyphosate isolado na faixa de 720 a 1080 g e.a. ha⁻¹ sobre *C. benghalensis* em início de florescimento não foram eficientes. Por outro lado, com as misturas de glyphosate (720 g e.a. ha⁻¹) com 2,4-D (670 g e.a. ha⁻¹) ou com carfentrazone (12 g i.a. ha⁻¹) o controle foi eficiente. Esses resultados foram obtidos quando as aplicações foram realizadas em março, que, segundo os autores, é uma época na qual é mais difícil o controle da trapoeiraba. O mesmo sinergismo não foi observado nas misturas com metsulfuron e flumioxazin.

Para *C. vilosa*, glyphosate isolado em altas doses ou em baixas doses em misturas com 2,4-D, metsulfuron, iodosulfuron, carfentrazone e mesotrione não foram efetivos no controle da infestante. O glyphosate só foi eficiente para o controle desta planta daninha quando, após sua aplicação, realizou-se aplicação complementar de [diuron+paraquat].

O glyphosate só foi eficiente para o controle de *C. difusa* quando em associação com 2,4-D, o mesmo não acontecendo quando as misturas de glyphosate foram feitas com carfentrazone, metsulfuron e flumioxazin.

Em relação à *C. erecta*, o glyphosate isolado, quer em aplicação única em doses elevadas ou em aplicações sequenciais, não foi eficiente no seu controle. As misturas de glyphosate com 2,4-D, metsulfuron, chlorimuron, flumioxazin e imazethapyr também não foram eficientes. Só foi verificada eficiência para o glyphosate, isolado ou em mistura com 2,4-D, quando estes tratamentos foram complementados pela mistura de [diuron+paraquat]. Misturas de glyphosate+carfentrazone também promoveram bom controle desta espécie de trapoeiraba.

O controle de azevém (*Lolium multiflorum*) resistente a glyphosate só foi possível com a associação do clethodim ao glyphosate em pomares de maçã. Rizzardi et al. (2006a) ressaltam ainda que mesmo a aplicação de glyphosate a 12 L ha⁻¹ não foi suficiente para o controle do azevém e que o clethodim, mesmo isolado, nas doses de 0,30 e 0,35 L ha⁻¹, proporcionou controle de 100%. Em trabalho semelhante, conduzido visando a dessecação pré-semeadura da soja, Rizzardi et al. (2006b) relatam que controle eficiente do azevém só foi obtido pela aplicação de clethodim ou quizalafop isolados ou pela associação de glyphosate com clethodim.

Christoffoleti et al. (2006) analisando o comportamento de misturas de herbicidas contendo glyphosate para o controle de *Conyza bonariensis* e *Conyza canadensis* concluíram que apenas a mistura de glyphosate+metsulfuron-methyl foi eficiente, proporcionando controle acima de 80% a partir de 30 DAA. O glyphosate isolado testado em doses de até 8640 g i.a. ha⁻¹ não controlou nenhuma das espécies de forma satisfatória. Mais recentemente, Moreira et al. (2007) evidenciaram também que estes biótipos resistentes não foram controlados com doses isoladas de glyphosate até 5760 g i.a. ha⁻¹, mas também podem ser eficientemente controlados de forma eficiente pelas misturas de glyphosate+2,4-D (1440+1005 g ha⁻¹), glyphosate+metsulfuron (1440+2,4 g ha⁻¹), glyphosate+metsulfuron (1440+3,6 g ha⁻¹), glyphosate+metribuzin (1440+480 g ha⁻¹).

3. Misturas de Herbicidas Contendo Glyphosate Visando Aplicações Após o Plantio das Culturas

A esperança original era a de que culturas geneticamente modificadas permitiriam uma substancial redução na aplicação de herbicidas – uma única aplicação de glyphosate era tudo o que muitos assumiam ser necessário para muitas culturas.

O entendimento geral é que, para que aplicações únicas de glyphosate possam promover níveis desejáveis de controle de planta daninhas, geralmente é necessário retardar a aplicação até que o máximo possível de plantas daninhas tenha emergido. Isto pode significar períodos relativamente longos de crescimento não controlado para plantas de germinação precoce, levando, em última instância, a perdas de produtividade.

Não é surpresa, portanto, que muitos pesquisadores tenham passado a pesquisar e recomendar aplicações múltiplas deste herbicida – ou seu uso em conjunção com outros herbicidas que promovam controle residual – de modo a preservar o potencial produtivo da cultura.

Existem diferenças claras entre locais e anos de cultivo em relação a qual é o método mais efetivo. No entanto, exceto para os casos que apresentam infestações particularmente favoráveis em termos de controle, aplicações únicas de herbicidas como glyphosate sem a ajuda de nenhum outro produto parecem estar se tornando uma coisa do passado nos Estados Unidos. Isto ocorre em tal extensão que alguns estudos nem incluem mais cenários de aplicações isoladas dentro de seus experimentos.

Norris et al. (2001) avaliam que combinações de herbicidas são benéficas porque requerem menor tempo para aplicação e custam menos comparados à aplicação de cada herbicida individualmente, e porque elas podem aumentar o espectro de plantas daninhas controladas.

3.1 Trabalhos com ênfase no controle residual das misturas

Doses reduzidas de herbicidas com atividade residual e herbicidas foliares não seletivos podem frequentemente resultar em antagonismo; no entanto, quando as doses de herbicidas não seletivos são aumentadas, as respostas antagonísticas decrescem (Hydrick & Shaw, 1994).

Dirks et al. (2000) estudaram diferentes possibilidades de combinação (em tanque, sequencial) de sulfentrazone, chlorimuron e glyphosate, na dessecação, em PÓSp, PÓS e PÓSt e na rebrota. Os melhores resultados de lucratividade e produtividade da soja e melhor controle de plantas daninhas foram associados a tratamentos que tinham dessecação seguida de aplicações em PÓS, os quais foram melhores do que a aplicação única de herbicidas.

Vanlieshout & Loux (2000) conduziram estudos por três anos, em três localidades diferentes dos EUA, com os seguintes objetivos: (a) avaliar a eficácia de herbicidas seletivos residuais usados sozinhos em plantas daninhas emergidas no momento do plantio direto de soja (b) determinar a dose de glyphosate necessária para suplementar os herbicidas com atividade residual para obter controle aceitável das plantas daninhas e (c) determinar o efeito do estágio de desenvolvimento das plantas daninhas na dose de glyphosate necessária. Os experimentos consistiram de uma combinação fatorial de quatro doses de glyphosate (0, 280, 560 e 840 g ha⁻¹), duas épocas de aplicação (precoce – 0 a 1 cm e tardia – 15 a 30 cm de altura das plantas daninhas) e seis herbicidas com atividade residual (nenhum, metribuzin+chlorimuron, linuron+chlorimuron, chlorimuron, imazethapyr e imazaquin).

Misturas contendo metribuzin + chlorimuron + glyphosate e linuron + chlorimuron + glyphosate (280 g e.a. ha⁻¹) resultaram em controle

maior ou igual a 85% de *Polygonum pennsylvanicum*, assim como a mistura de glyphosate (560 g a.e. ha⁻¹) com imazethapyr e glyphosate com imazaquin. Todos os herbicidas com atividade residual em mistura com glyphosate a 280 g e.a. ha⁻¹ proporcionaram controle maior ou igual a 85% para *Setaria faberi*. O mesmo nível de controle foi obtido para *Chenopodium album*, com as misturas dos herbicidas com glyphosate a 560 g e.a. ha⁻¹ (Vanlieshout & Loux, 2000). Estes resultados indicam que o aumento da dose do glyphosate nas misturas pode suplantiar eventuais efeitos antagonísticos de misturas contendo este herbicida.

De modo geral, considerou-se que o desempenho de doses reduzidas do glyphosate depende da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta daninha no momento da aplicação. Os autores consideram ainda que o uso de herbicidas com atividade residual seletivos com atividade foliar pode promover controle de espécies emergidas com doses reduzidas de glyphosate. Em alguns casos, a necessidade de glyphosate foi eliminada. Os resultados são similares àqueles obtidos em sistemas de produção com rotação de culturas e indicam uma maneira de reduzir os custos de herbicidas no plantio direto de soja. No entanto, a habilidade de reduzir ou eliminar o glyphosate vai demandar um manejo mais intensivo pelos produtores. O sucesso dos programas de manejo de plantas daninhas dependerá do grau de ajuste entre o espectro de controle dos herbicidas com atividade residual e o espectro de plantas daninhas presentes. Se as espécies presentes não forem controladas pela atividade foliar dos herbicidas com atividade residual, então doses reduzidas de glyphosate podem não ser suficientes. O mesmo pode acontecer no caso de o estágio da planta daninha no momento da aplicação tiver efeito sobre a dose de glyphosate necessária para obter controle. Condições ambientais no momento da aplicação podem também afetar o potencial de obtenção de controles aceitáveis com doses reduzidas de glyphosate. Condições de estresse como frio ou veranicos podem reduzir a eficácia do herbicida e, portanto, demandar o uso de maiores doses de glyphosate. Os produtores que desejarem adotar um programa de doses reduzidas de glyphosate precisarão estar cientes das suas limitações e estar preparados para o uso de tratamentos herbicidas em pós-emergência.

De acordo com Taylor-Lovell et al. (2002), o glyphosate aplicado em pós-emergência em soja RR controla um amplo espectro de plantas daninhas gramíneas e folhas largas. Mas em áreas com espécies como *Amaranthus rudis*, que emerge durante praticamente todo o ciclo da soja, uma única aplicação de glyphosate pode não ser suficiente para promover o controle por todo o ciclo. Para melhorar o controle, um herbicida residual pode ser misturado em tanque, mas certas misturas têm resultado em antagonismo da atividade do glyphosate no controle de algumas plantas daninhas.

Ao comparar o controle de plantas daninhas no início do ciclo com aplicações de glyphosate isoladas ou em mistura em tanque com flumiox-

zin e pendimethalin e avaliar os benefícios de um programa de controle de plantas daninhas comparado a uma aplicação única de glyphosate, Taylor-Lovell et al. (2002) concluíram que aplicações sequenciais incluindo um herbicida PRÉ promoveram até 25% a mais de controle de plantas daninhas quando comparados a tratamentos exclusivamente em PÓS, o que também levou a maiores produtividades da soja para aqueles tratamentos. Também demonstraram que a utilização de aplicações sequenciais de PRÉ seguiu de PÓS elimina o problema encontrado para muitas interações de misturas em tanque aplicadas em PÓS, incluindo o antagonismo e o aumento da injúria da soja. Embora isto possa resultar numa aplicação extra, esta pode ser a opção mais efetiva para aumentar a eficácia com certos herbicidas de PÓS. A aplicação de herbicidas em PRÉ também permite ao agricultor controlar as plantas daninhas antes que elas se tornem grandes demais para serem adequadamente controladas e tratadas quando as condições climáticas e de campo permitam.

Tharp & Kells (2002) investigaram se herbicidas com atividade residual (atrazine, acetochlor, flumetsulam, metolachlor e pendimethalin) podiam ser usados em mistura com glyphosate ou glufosinate para proporcionar controle durante todo o ciclo em milho resistente à glyphosate e à glufosinato. Aplicações em PRÉ de diversos herbicidas com atividade residual seguidas de aplicações em PÓS de glyphosate e glufosinate foram comparadas com misturas em tanque de glyphosate+residuais ou glufosinate+residuais, aplicadas em PÓS. Todos os herbicidas com atividade residual usados em combinação com glyphosate, quando comparados ao uso do glyphosate sozinho, aumentaram o controle de *Amaranthus retroflexus* e *Chenopodium album* (20% em média) e de 4 a 19% para *Setaria faberi*. O controle de *Abutilon theophrasti* foi reduzido em 12% quando o glyphosate foi usado em mistura em tanque com a metade da dose de atrazine, comparado ao uso da dose cheia de atrazine. O controle de *Chenopodium album* foi reduzido em 13% quando o glyphosate foi usado em mistura em tanque com meia dose de acetochlor, comparado ao uso da dose cheia de acetochlor. A produtividade não foi afetada por nenhum dos tratamentos, o que sugere que a seletividade para o milho transgênico não foi afetada.

Na cultura da batata RR, Hutchinson et al. (2003) avaliaram glyphosate isolado ou em aplicação sequencial e glyphosate em mistura em tanque com herbicidas com atividade residual (rimsulfuron, metribuzin e pendimethalin) aplicados em duas situações: pós-emergência precoce e pós-emergência tardia. Observaram que, dependendo do ano, as misturas de herbicidas com atividade residual com glyphosate ou a aplicação de sequencial de glyphosate controlaram melhor as plantas daninhas do que o glyphosate isolado em aplicação única precoce, o que demonstra a importância do efeito residual ou da reaplicação do glyphosate para o manejo consistente de fluxos de plantas daninhas emergidos após a aplicação inicial. Herbicidas com atividade residual em mistura em tanque com glyphosate

aplicados em pós-emergência tardia melhoraram o controle de *Amaranthus retroflexus*, *Chenopodium album* e *Setaria viridis*, comparados à aplicação de herbicidas com atividade residual isolados. Em relação à seletividade, nenhuma injúria para batata RR foi encontrada para os tratamentos avaliados. Em suma, aplicações sequenciais resultaram em maior retorno líquido do que aplicação única de glyphosate.

Ao sumarizar resultados de diversos trabalhos que avaliaram glyphosate isolado ou em combinação com outros herbicidas, Grey (2007) concluiu que os resultados de controle de plantas daninhas depende da espécie presente e da sua susceptibilidade ao glyphosate. Neste trabalho, conduzido por dois anos com o objetivo de avaliar o controle de plantas daninhas e a produtividade de soja cultivada em rotação com trigo no sistema de plantio direto, foram testadas combinações de tratamentos em pré-emergência (pendimethalin, imazethapyr, clomazone), aplicados isoladamente ou em combinação com aplicações em PÓS de glyphosate após a colheita do trigo. Concluiu-se que o controle de *Ipomoea purpurea* foi melhorado quando um herbicida PRÉ residual foi incluído com as aplicações em PÓS de glyphosate, quando comparados à aplicação sequencial do próprio glyphosate. A produtividade da soja foi aumentada quando um herbicida residual foi incluído com glyphosate.

3.2 Trabalhos com ênfase no controle em pós-emergência das misturas e na seletividade para as culturas

Chlorimuron aplicado com glyphosate controlou plantas daninhas de forma semelhante ou melhor do que a aplicação de glyphosate isolado (Hydrick & Shaw, 1994). Em outro trabalho, concluiu-se que a adição de chlorimuron ao glyphosate também contribuiu para o melhor controle de *Sesbania exaltata* (Vidrine et al., 1997).

Por outro lado, a mesma mistura apresenta resultados divergentes em outros trabalhos. A mistura de glyphosate com chlorimuron, fomesafen e sulfentrazone pode resultar em antagonismo na ação do glyphosate (Starke & Oliver, 1996). Neste trabalho, os autores relatam ainda que quando o glyphosate foi combinado com chlorimuron, 25% das avaliações foram consideradas antagonísticas, com nenhuma resposta sinérgica. Os mesmos autores também relatam que combinações de glyphosate com fomesafen foram antagonísticas em 70% dos casos.

A aparente ambiguidade de resultados sugere, na verdade, que as respostas em termos de sinergismo ou antagonismo para uma determinada mistura podem diferir em relação à infestação, às doses utilizadas ou a outros tipos de interação não consideradas

Starke & Oliver (1998) conduziram experimentos de campo com oito espécies de plantas daninhas para determinar se chlorimuron, fomesafen ou sulfentrazone (todos aplicados em duas doses – 50% e 100% da dose recomendada), foram complementares ao glyphosate (210 e 420 g i.a. ha⁻¹)

em misturas em tanque. Em laboratório, foram conduzidos experimentos com ^{14}C -glyphosate para avaliar se a absorção e translocação eram afetadas pelas misturas. No campo, misturas de glyphosate+chlorimuron foram geralmente aditivas no controle das plantas daninhas. Em laboratório, ficou comprovado que o chlorimuron não diminuiu a absorção do glyphosate em plantas de *Echinochloa crusgalli*, *Ipomoea lacunosa*, *Abutilon theophrastis*. Por outro lado, o glyphosate aumentou a absorção do ^{14}C -chlorimuron para *Amaranthus palmeri* e *Abutilon theophrastis*. Todas as combinações de fomesafen+glyphosate foram antagonísticas para *Eleusine indica*, *Senna obtusifolia*, *Amaranthus palmeri* e *Abutilon theophrastis*. Três entre quatro destas combinações foram antagonísticas para *E. crusgalli*, *Ipomoea hederacea*. Fomesafen diminuiu a absorção e a translocação de ^{14}C -glyphosate em *E. crusgalli*, *I. lacunosa* e *A. theophrastis*. Noventa por cento das combinações de glyphosate+imazethapyr foram aditivas ou sinérgicas, sendo o sinérgismo verificado para todas as combinações e doses de imazethapyr para *I. lacunosa*. Adição de glyphosate ao imazethapyr aumentou a absorção do ^{14}C -imazethapyr para *A. palmeri* e *A. theophrastis*. As misturas em tanque de glyphosate com sulfentrazone foram antagonísticas em todas as doses e combinações para *E. crusgalli* e *A. palmeri* e em três de quatro combinações foram antagonísticas para *E. indica* e *I. hederacea*, indicando que estes herbicidas não são complementares em misturas em tanque.

O trabalho de Norris et al. (2001), realizado em casa de vegetação, fornece uma excelente idéia a respeito das interações que podem ocorrer em misturas em tanque de glyphosate com outros herbicidas especificamente em relação ao controle de plantas daninhas em pós-emergência (estádio de 4 a 8 cm – duas semanas após a emergência) (Tabelas 1 e 2). Em ambas as tabelas, as formulações de glyphosate são denominadas de M = Roundup Ultra (Monsanto); C = Glyphos (Cheminova); Z = Touchdown (Zeneca), e os símbolos + e – denotam, respectivamente, sinérgismo e antagonismo, baseado em Colby (1967).

Norris et al. (2001) discutem que a adição de herbicidas seletivos ao glyphosate não melhorou o nível de controle de *E. crusgalli*, mas também causou pouco ou nenhum efeito detrimental. O antagonismo para esta espécie de planta daninha ocorreu principalmente quando o glyphosate foi combinado com herbicidas para folhas largas duas semanas após a aplicação, sendo que quatro semanas após as aplicações, em muitos casos as misturas saíram de uma situação de antagonismo inicial para uma situação de sinérgismo, de acordo com a fórmula de Colby, muito embora não tenham necessariamente atingido níveis de controle elevados. Também ressaltam que a adição de herbicidas seletivos ao glyphosate normalmente aumenta o controle de *Sesbania exaltata*, especialmente em relação ao acúmulo de biomassa. Algum antagonismo ocorreu entre os diversos herbicidas seletivos e o glyphosate no controle de *Sida spinosa* e *Ipomoea lacunosa*. A maioria das situações de antagonismo ocorreu com combinações de glyphosate e

Tabela 1. Controle de plantas daninhas duas semanas após a aplicação de três formulações glyphosate isoladas ou em misturas em tanque. Fonte: Norris et al. (2001).

Herbicida	Dose g ha ⁻¹	Formula- ção glyphosate	<i>E.</i>	<i>S.</i>	<i>I.</i>	<i>S.</i>
			<i>crus-</i> <i>galli</i>	<i>spi-</i> <i>nosa</i>	<i>lacu-</i> <i>nosa</i>	<i>eval-</i> <i>tata</i>
%						
Glyphosate	560	M	82	30	45	20
Glyphosate	560	C	85	28	50	22
Glyphosate	560	Z	88	31	50	24
Acifluorfen	210	-	25	0	62	88
Chlorimuron	4,4	-	25	0	33	7
Cloransulam(C)	8,8	-	35	19	10	13
C+flumetsulam	8,8+3,5	-	18	11	10	5
Flumiclorac	16	-	44	15	29	28
Fomesafen	210	-	53	6	82	92
Lactofen	112	-	35	11	92	99
Imazaquin	70	-	34	5	11	20
Imazethapyr	35	-	35	13	30	0
Acifluorfen	210	M	73-	35	87+	100+
Chlorimuron	4,4	M	67-	29	52-	50+
Cloransulam(C)	8,8	M	58-	8-	63+	55+
C+flumetsulam	8,8+3,5	M	78-	37-	29-	36+
Flumiclorac	16	M	73-	32	55-	70+
Fomesafen	210	M	45-	32	93+	100+
Imazaquin	70	M	50-	32	22-	76+
Imazethapyr	35	M	66-	5-	42-	41+
Lactofen	112	M	61-	76+	100+	87-
Acifluorfen	210	C	75-	24	100+	100+
Chlorimuron	4,4	C	36-	24	42-	50+
Cloransulam(C)	8,8	C	74-	52	24-	55+
C+flumetsulam	8,8+3,5	C	91-	15-	33-	36+
Flumiclorac	16	C	83-	76+	69-	70+
Fomesafen	210	C	73-	43	76-	100+
Imazaquin	70	C	84-	33	45-	76+
Imazethapyr	35	C	92	35	38-	41+
Lactofen	112	C	21-	34	66-	87-
Acifluorfen	210	Z	75-	25	90+	100+
Chlorimuron	4,4	Z	83-	28	68	99+
Cloransulam(C)	8,8	Z	34-	15	43-	50+
C+flumetsulam	8,8+3,5	Z	54-	0-	60+	0-
Flumiclorac	16	Z	86-	59+	66	71+
Fomesafen	210	Z	20-	43	0-	31-
Imazaquin	70	Z	75-	36	27-	66+
Imazethapyr	35	Z	65-	0-	41-	5-
Lactofen	112	Z	60-	15-	35-	83-
Testemunha			0	0	0	0
DMS (5%)			4	14	3	3

Tabela 2. Redução de massa fresca de quatro espécies após quatro semanas da aplicação em pós-emergência de formulações de glyphosate isoladas ou em misturas em tanque. Fonte: Norris et al. (2001).

Herbicida	Dose g ha ⁻¹	Formula- ção glyphosate	%			
			<i>E.</i> <i>crus-</i> <i>galli</i>	<i>S.</i> <i>spi-</i> <i>nosa</i>	<i>I.</i> <i>lacu-</i> <i>nosa</i>	<i>S.</i> <i>exal-</i> <i>tata</i>
Glyphosate	560	M	19	60	46	46
Glyphosate	560	C	26	61	45	44
Glyphosate	560	Z	28	60	48	43
Acifluorfen	210	-	14	33	56	36
Chlorimuron	4,4	-	16	34	52	31
Cloransulam(C)	8,8	-	17	50	29	32
C+flumetsulam	8,8+3,5	-	19	38	39	24
Flumiclorac	16	-	53	50	62	39
Fomesafen	210	-	43	20	73	83
Imazaquin	70	-	11	59	37	36
Imazethapyr	35	-	34	51	31	0
Lactofen	112	-	17	48	61	97
Acifluorfen	210	M	64+	39-	74	83+
Chlorimuron	4,4	M	39	58-	60-	89+
Cloransulam(C)	8,8	M	67+	41-	43-	64
C+flumetsulam	8,8+3,5	M	87+	48-	33-	8-
Flumiclorac	16	M	63	49-	45-	50-
Fomesafen	210	M	42	55	72-	96
Imazaquin	70	M	59+	57-	59	48-
Imazethapyr	35	M	64+	51-	24-	46+
Lactofen	112	M	63+	45-	63-	92
Acifluorfen	210	C	69+	38-	85	94+
Chlorimuron	4,4	C	72-	0-	27-	91+
Cloransulam(C)	8,8	C	64+	44-	44-	87+
C+flumetsulam	8,8+3,5	C	19-	29-	32-	9-
Flumiclorac	16	C	64	61-	58-	84+
Fomesafen	210	C	50	46-	53-	80
Imazaquin	70	C	36	54-	65	93+
Imazethapyr	35	C	0-	41-	29-	29-
Lactofen	112	C	81+	37-	14-	38-
Acifluorfen	210	Z	69+	34-	68	87+
Chlorimuron	4,4	Z	72-	47-	46-	96+
Cloransulam(C)	8,8	Z	64+	47-	34-	27-
C+flumetsulam	8,8+3,5	Z	19-	50-	54-	0-
Flumiclorac	16	Z	64	65-	49-	9-
Fomesafen	210	Z	50	53-	5-	51-
Imazaquin	70	Z	36	47-	55	30-
Imazethapyr	35	Z	0-	26-	6-	54+
Lactofen	112	Z	81+	0-	35-	61-
Testemunha			0	0	0	0
DMS (5%)			13	14	12	7

inibidores da ALS, e o antagonismo se manifesta mais na avaliação realizada quatro semanas após a aplicação do que na avaliação realizada duas semanas após a aplicação (Tabelas 1 e 2).

Por fim, os autores concluíram que a combinação de herbicidas seletivos com glyphosate aumentou o controle de espécies de folha larga de difícil controle e que a formulação do glyphosate é importante no comportamento das misturas. Além disto, afirmam que a mistura de herbicidas pode reduzir a necessidade de aplicações repetidas de glyphosate, o que pode ser benéfico, uma vez que nem sempre as condições climáticas permitem a aplicação do glyphosate.

É possível concluir que a mistura de herbicidas com glyphosate tem o comportamento afetado pela espécie de planta daninha, pelas diferentes formulações de glyphosate disponíveis no mercado e pelo herbicida que é misturado ao glyphosate. Embora o foco desta revisão seja a avaliação de possíveis efeitos antagonísticos que herbicidas utilizados em mistura em tanque podem causar à atividade do glyphosate, é importante considerar que no caso deste trabalho específico, o próprio glyphosate acaba causando um efeito antagonístico sobre a atividade do lactofen, como pode ser observado para o controle de *Sesbania exaltata*. Também se observa que avaliações de curta duração podem resultar em falsas interpretações do controle final da mistura, pois existem casos onde na avaliação inicial (duas semanas após a aplicação) os efeitos eram antagonísticos e passaram a ser nulos ou sinérgicos na avaliação final (quatro semanas após as aplicações) e vice-versa.

Shaw & Arnold (2002) estudaram glyphosate isolado e em mistura com acifluorfen, oxasulfuron, chlorimuron, cloransulam, fomesafen, imazaquin e pyrithiobac. Demonstraram que o controle de *Sorghum halepense* e de *Brachiaria platyphilla* pelo glyphosate não foi afetado pelos herbicidas seletivos aplicados em mistura. Em relação à *Ipomoea lacunosa*, o controle foi de zero (com glyphosate a 280 g i.a. ha⁻¹) para 67% (com glyphosate a 840 g i.a. ha⁻¹). Houve um efeito aditivo quando os herbicidas seletivos foram adicionados a 280 g ha⁻¹ de glyphosate. Quando o acifluorfen foi adicionado a 560 g ha⁻¹ de glyphosate, controle da *Ipomoea* aumentou de 55% (com glyphosate sozinho) para 100% (na mistura). De forma similar, a adição de fomesafen ou acifluorfen a glyphosate (840 g ha⁻¹) aumentou o controle de 67% (glyphosate sozinho) para 90% (com glyphosate+fomesafen) e para 98% (com glyphosate+acifluorfen). Apenas as misturas em tanque de acifluorfen, oxasulfuron ou fomesafen com 840 g ha⁻¹ de glyphosate reduziram a matéria fresca de *I. lacunosa* comparados à glyphosate sozinho, quatro semanas após a aplicação dos tratamentos. A adição de chlorimuron e pyrithiobac a glyphosate (1120 g ha⁻¹) aumentou o controle de *Sesbania exaltata* para 88 e 99%, respectivamente, comparados a um controle de 45% com glyphosate sozinho, duas semanas

após o tratamento. Oxasulfuron, cloransulam, imazaquin e pyriithiobac foram antagonísticos para a redução do peso da matéria fresca de *Sesbania exaltata*.

Trabalhos conduzidos por três anos com misturas de glyphosate com acifluorfen, oxasulfuron, chlorimuron, fomesafen, oxasulfuron ou lactofen evidenciaram que *Echinochloa crusgalli* foi controlada no mínimo em 95% com glyphosate (840 e 1120 g e.a. ha⁻¹) e o controle não foi antagonizado por nenhuma das misturas. Aos 14 DAA, *Euphorbia heterophylla* e *Sida spinosa* foram controladas em pelo menos 90% com todos os tratamentos com glyphosate. O controle permaneceu maior que 90% aos 28 DAA em um de dois anos, mas em um ano o leiteiro foi controlado em 80% e a *S. spinosa* foi controlada em 43% com a dose alta do glyphosate. Acifluorfen, fomesafen ou lactofen (a 210 e 315 g ha⁻¹) aplicados com glyphosate aumentaram o controle de *E. heterophylla* para 91 a 95% e de *Ipomoea lacunosa* para 60 a 83%. Aos 14 DAA o controle de *I. lacunosa* na maioria dos casos aumentou quando glyphosate foi misturado com acifluorfen, fomesafen, lactofen, chlorimuron e oxasulfuron. O controle de *Sesbania exaltata* foi aumentado quando o glyphosate foi aplicado com os mesmos herbicidas assim como com oxasulfuron (a 39 e 59 g ha⁻¹) e chlorimuron (a 4,5 e 6,7 g ha⁻¹). Mas, aos 28 DAA, a melhora no controle de plantas daninhas com glyphosate e herbicidas para folhas largas foi observada apenas em um dos anos do trabalho, quando a *I. lacunosa* e *Sesbania exaltata* estavam maiores (15 a 18 cm) por ocasião da aplicação dos herbicidas. O glyphosate sozinho em 1998 controlou não mais do que 30% da *S. exaltata* e da *I. lacunosa*, e nas misturas com herbicidas de folhas largas o controle de *S. exaltata* foi consistente e superior a 80% quando na mistura com acifluorfen ou lactofen. A injúria na soja (28 DAA) consistia principalmente em clorose e redução do crescimento, e foi quantificada em 14, 13 e 23% para os tratamentos com acifluorfen, chlorimuron e lactofen, mas em não mais do que 6% para oxasulfuron e fomesafen. Quando o controle de plantas daninhas com glyphosate sozinho foi de pelo menos 85%, a adição de herbicidas para folhas largas não aumentou a produtividade da soja (Ellis & Griffin, 2003).

A mistura em tanque de glyphosate com diversos herbicidas (cloransulam-methyl, chlorimuron, imazamox, acifluorfen, fomesafen, lactofen, flumetsulam, carfentrazone) não aumentou significativamente o controle de *Setaria faberi*, *Amaranthus rudis*, *Chenopodium album* e *Abutilon theophrasti*, comparado com o controle obtido por glyphosate isolado. De forma similar, a adição de qualquer destes herbicidas em mistura em tanque não melhorou o controle de glyphosate sobre *Ipomoea hederacea*, quando as misturas foram aplicadas no estágio de 10 cm de desenvolvimento da planta daninha. No entanto, quando as aplicações foram realizadas com a *I. hederacea* no estágio de 20 cm de desenvolvimento houve melhor controle com as misturas glyphosate+lactofen, glyphosate +acifluorfen e glyphosate

+fomesafen em comparação ao glyphosate isolado (Bradley, 2004). Estes resultados sugerem que uma maior eficiência das misturas de glyphosate com outros herbicidas depende da espécie da planta daninha presente assim como do seu estágio de desenvolvimento no momento da realização das aplicações.

Tao et al. (2007) avaliaram a mistura de glyphosate+bentazon para o controle de canola RR, *Polygonum convolvulus* e trigo e concluíram que a mistura foi sinérgica para a canola RR e para *P. convolvulus*, mas foi antagonística para o controle de trigo. A eficácia de glyphosate+bentazon sobre canola RR foi aumentada pelo sulfato de amônio, por surfactante não iônico e por surfactante siliconado, mas foi levemente reduzida por óleo metilado de sementes ou concentrados oleosos de petróleo. Os ingredientes inertes da formulação de glyphosate (surfactantes catiônicos, NH_4 ou K) contribuíram para o sinérgismo de glyphosate com bentazon. Neste trabalho também avaliaram a mistura de glyphosate+quizalafop para o controle de milho RR e de *Abutilon theophrasti*, concluindo que a mistura foi aditiva para o controle de ambas as espécies.

Misturas de MSMA com glyphosate e glufosinate são muito usadas em algodão RR nos EUA. Contudo, a mistura de MSMA ao glyphosate não melhora o controle de plantas daninhas quando comparado com glyphosate isolado ou MSMA isolado. Inclusive, tem sido demonstrado que o MSMA antagoniza o glyphosate em termos de eficácia de controle para *Brachiaria ramosa*, *Echinochloa crusgalli*, *Sesbania exaltata* e *Amaranthus palmeri*. Concluiu-se que o antagonismo que o MSMA causa ao glyphosate em plantas como *B. ramosa*, *A. palmieri* e outras é causado pela redução na translocação do glyphosate e não por efeitos sobre a absorção do produto (Burke et al., 2007; Koger et al., 2007).

Os relatos de trabalhos conduzidos no Brasil com foco no controle em pós-emergência proporcionado por misturas de herbicidas contendo glyphosate são em pequeno número. A maior parte dos trabalhos enfoca, com maior ênfase, aspectos relacionados à seletividade das misturas para culturas.

Destacam-se trabalhos como os de Albert et al. (2004) que verificaram que glyphosate isolado ($0,42 \text{ kg e.a. ha}^{-1}$) aplicado sobre *Spermacoce latifolia* com quatro a seis pares de folhas definitivas proporcionou, no máximo, controle de 30%, ao passo que, quando em mistura com os herbicidas lactofen ($0,15 \text{ kg ha}^{-1}$), carfentrazone ($0,03 \text{ kg ha}^{-1}$) e flumioxazin ($0,05 \text{ kg ha}^{-1}$), passou a apresentar controle satisfatório da mesma. Os herbicidas lactofen e flumioxazin isolados ou em mistura com glyphosate proporcionaram redução de 100% da biomassa da planta daninha.

Valente et al. (2006) verificaram que as misturas de glyphosate+chlorimuron foram mais seletivas a soja geneticamente modificada (variedade CD-214 RR) quando aplicadas em estádios mais avançados da cultura.

Correia et al. (2006) em trabalhos com soja geneticamente modificada, observaram que a mistura de glyphosate com os herbicidas chlorimuron-ethyl e fomesafen resultou em sintomas leves de fitointoxicação, com recuperação das plantas já nos primeiros dias. Contudo, a associação de glyphosate aos herbicidas lactofen e flumioxazin causou severa intoxicação visual às plantas de soja, com necrose e pontos cloróticos nas folhas. Os efeitos fitotóxicos destas misturas foram mais agressivos do que aqueles observados com a aplicação isolada dos herbicidas. Mesmo assim, a altura das plantas e o acúmulo de massa não foram afetados pelos herbicidas, aplicados isolados ou em mistura, mostrando que as plantas, mesmo aquelas com maior fitointoxicação aparente, conseguiram recuperar o crescimento vegetativo.

Em experimento para o controle de diversas espécies de convolvuláceas em pós-emergência, Vidal et al. (2006) avaliaram o antagonismo/sinergismo, segundo o modelo multiplicativo, da associação de glyphosate com herbicidas inibidores da ALS (13 g ha⁻¹ de chlorimuron e 50 g ha⁻¹ de imazethapyr) ou da PROTOX (120 g ha⁻¹ de lactofen), quando da aplicação em plantas daninhas no estágio de quatro a oito folhas. As espécies controladas (>90%) com glyphosate isolado a 720 g ha⁻¹ foram *Ipomoea hederifolia*, *Ipomoea quamoclit* e *Merremia cissoides*. As espécies *Ipomoea grandifolia*, *Ipomoea nil*, *M. aegyptia* e *Ipomoea purpurea* não foram controladas (<70%) por esta dose de glyphosate. Nenhuma das espécies foi controlada (<80%) com os herbicidas inibidores de PROTOX ou de ALS aplicados isoladamente nas doses utilizadas. A associação de glyphosate com chlorimuron ou imazethapyr propiciou sinergismo suficiente para o controle (>90%) de *I. grandifolia*. A associação de glyphosate com chlorimuron propiciou sinergismo suficiente para o controle (>90%) de *M. aegyptia*. Foram verificados antagonismos entre glyphosate e lactofen no controle de *I. grandifolia*; também para glyphosate com chlorimuron ou imazethapyr no controle de *I. nil*, e ainda para glyphosate+imazethapyr no controle de *I. purpurea*.

Penckowski & Podolan (2007a) verificaram que as misturas de glyphosate potássico com lactofen, fomesafen, flumiclorac-pentyl ou flumioxazin tenderam a reduzir o controle de *Spermacoce latifolia* (aplicações no estágio de duas a quatro folhas) em comparação com aplicações de glyphosate potássico isolado. Com relação à fitointoxicação na soja BRS 247 RR, os sintomas de injúria, caracterizados pela necrose de folhas, foram evidentes para todas as misturas, observando-se uma ordem decrescente de magnitude nos tratamentos com flumioxazin, flumiclorac, lactofen e fomesafen.

Com relação à tolerância diferencial de variedades de soja RR a tratamentos contendo glyphosate em misturas com outros herbicidas, informações não publicadas (Adegas & Brighenti, 2007 – comunicação pessoal) destacam a importância de se considerar a variedade utilizada. Em trabalho conduzido em parcelas subdivididas, foram avaliados como fator da

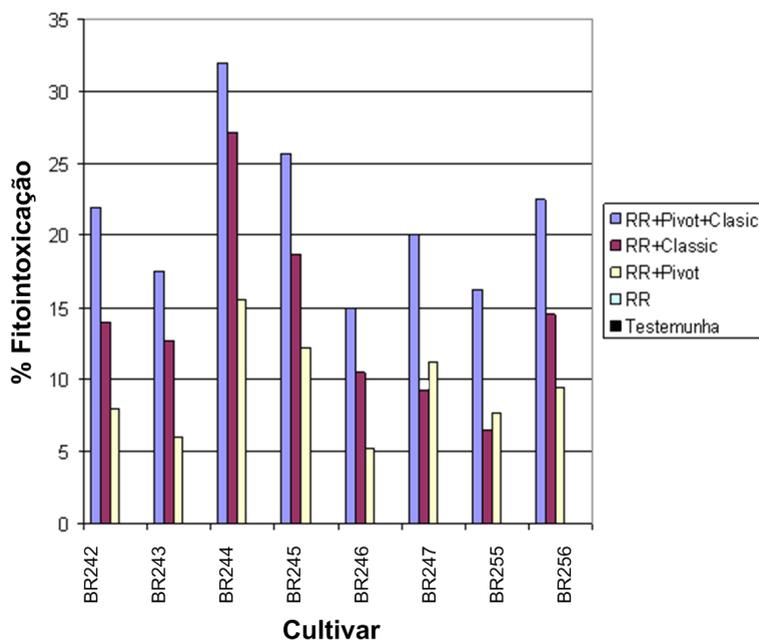


Figura 1. Variabilidade de fitointoxicação em variedades de soja geneticamente modificadas para resistência à glyphosate em resposta a aplicações de misturas de herbicidas em pós-emergência. Fonte: Adegas & Brighenti – Comunicação pessoal.

parcela nove variedades de soja RR, e como fator da subparcela tratamentos herbicidas com glyphosate isolado (Roundup Ready), ou em misturas em tanque com imazethapyr (Pivot), chlorimuron (Classic), e com imazethapyr+chlorimuron, além de uma testemunha capinada. A aplicação dos herbicidas foi realizada quando a soja se encontrava em V3-V4. Seus resultados indicam que as injúrias (Figura 1) e a produtividade (Figura 2) da soja variam em função das variedades e das diferentes misturas utilizadas, reafirmando a necessidade de trabalhos que quantifiquem com precisão a reação das cultivares RR disponíveis no mercado nacional para que possam ser realizadas aplicações seguras do ponto de vista de seletividade.

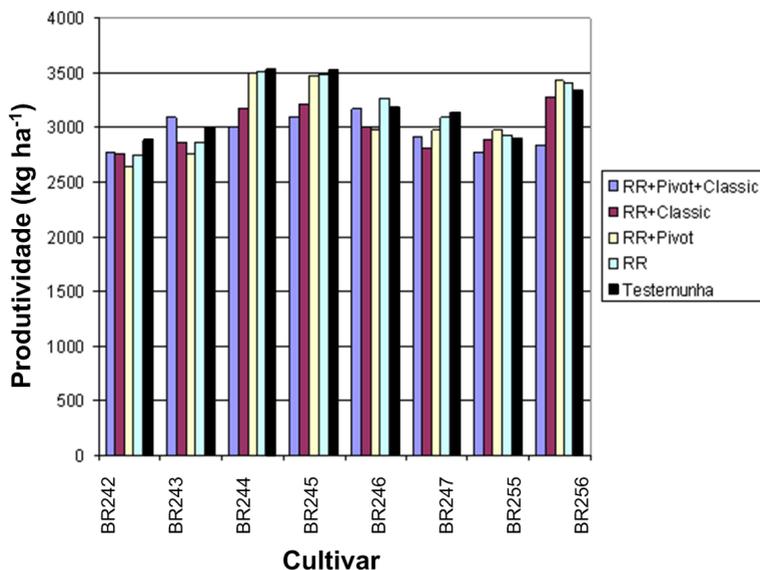


Figura 2. Produtividade de variedades de soja geneticamente modificadas para resistência à glyphosate em resposta a aplicações de misturas de herbicidas em pós-emergência. Fonte: Adegas & Brighenti – Comunicação pessoal.

3.3 Trabalhos abordando a ação residual e de pós-emergência das misturas

Monquero et al. (2001) afirmam que o uso intensivo de glyphosate como herbicida não seletivo tem selecionado espécies de plantas daninhas tolerantes. Desta forma, é importante que sejam estudadas misturas em tanque com herbicidas de mecanismos de ação alternativos e que apresentem efeitos sinérgicos ou aditivos. Por esta razão, instalaram experimento composto por 13 tratamentos, em casa de vegetação em Piracicaba, SP, com as plantas daninhas *Richardia brasiliensis*, *Commelina benghalensis*, *Amaranthus hybridus*, *Galinsoga parviflora* e *Ipomoea grandifolia*. Os tratamentos foram compostos por misturas em tanque dos herbicidas chlorimuron-ethyl, sulfentrazone, carfentrazone, bentazon ou flumioxazin com glyphosate. As interações foram aditivas para as plantas daninhas *I. grandifolia* e *C. benghalensis*, e os herbicidas flumioxazin, sulfentrazone e carfentrazone aplicados isoladamente e em mistura com glyphosate foram os que proporcionaram os melhores níveis de controle. A interação de glyphosate com sulfentrazone foi antagônica em *R. brasiliensis*; a mistura de glyphosate com os demais herbicidas estudados foi aditiva, sendo

os tratamentos com mistura de glyphosate e chlorimuron-ethyl ou flumioxazin os mais eficazes. Em *A. hybridus*, os tratamentos que apresentaram melhores níveis de controle foram o glyphosate e carfentrazone, aplicados isoladamente, e a mistura de glyphosate com flumioxazin, sulfentrazone, chlorimuron-ethyl e bentazon, sendo estas interações aditivas. No caso de *G. parviflora*, os tratamentos com flumioxazin e sulfentrazone apresentaram controle total, o mesmo acontecendo com as misturas de glyphosate com carfentrazone, flumioxazin, sulfentrazone, chlorimuron-ethyl ou bentazon.

Em três trabalhos (Rodrigues et al., 2002a,b,c) visando o controle de plantas daninhas e a seletividade para soja RR de glyphosate isolado ou em misturas com lactofen, imazaquin, imazethapyr, chlorimuron e trifluralin+imazaquin não foram observadas injúrias severas na soja, com total recuperação das plantas de soja RR. Em um dos três experimentos, foram observados índices de toxicidade de 15 a 20% na soja para a mistura glyphosate+lactofen, com posterior recuperação. Em relação ao controle de plantas daninhas de mais difícil controle, observou-se que para *Commelina benghalensis* a associação de glyphosate+lactofen foi semelhante ao controle das maiores doses (960 g ha⁻¹) de glyphosate isolado e melhor do que a menor dose (480 g ha⁻¹) deste herbicida. Para *Euphorbia heterophylla*, os melhores tratamentos foram glyphosate isolado nas maiores doses (960 g ha⁻¹) e também com as misturas de glyphosate+lactofen e glyphosate+imazaquin. Nas misturas, as doses de glyphosate foram a partir de 460 g ha⁻¹.

Gazziero (2006) mostra que a adição de diclosulam incrementou a atividade dos herbicidas dessecantes (glyphosate e 2,4-D). O experimento evidenciou que a aplicação de diclosulam a 30 g ha⁻¹ com glyphosate é uma alternativa para uso em programas de controle de plantas daninhas em soja geneticamente modificada para resistência ao glyphosate. As misturas de chlorimuron, lactofen e clethodim foram antagônicas ao glyphosate, reduzindo drasticamente o nível de controle das plantas infestantes. As plantas presentes nesta área eram *C. benghalensis*, *E. heterophylla*, *B. pilosa*, *A. tenella* e *B. plantaginea*.

Em outro trabalho realizado por Penckowski & Podolan (2007b), foram avaliados tratamentos com glyphosate isolado ou em misturas com cloransulam, chlorimuron e imazethapyr (mistura formulada e mistura em tanque), lactofen ou fomesafen, além de um tratamento-padrão composto por pela mistura tripla de cloransulam+imazethapyr+lactofen, todas aplicadas no estádio V4 da soja CD 214 RR, e com as plantas daninhas de folhas largas no estádio entre duas a oito folhas e as folhas estreitas no estádio entre uma a cinco perfilhos. Foram ainda avaliadas as misturas de glyphosate com imazaquin, diclosulam e flumetsulam aplicadas no estádio V2 da soja, quando as plantas daninhas de folhas largas se encontravam entre duas e seis folhas e as de folha estreita entre uma e três

folhas. Como resultado, observou-se que para *Ipomoea grandifolia* os herbicidas lactofen, fomesafen e flumetsulam apresentaram antagonismo na ação de controle do glyphosate, sendo estas misturas inferiores aos demais tratamentos, os quais foram considerados eficientes. Para esta planta daninha, as duas misturas de glyphosate+imazethapyr, assim como a de glyphosate+cloransulam foram superiores à menor dose (540 g e.a. ha⁻¹) e equivalentes à maior dose (1080 g e.a. ha⁻¹) de glyphosate isolado. Para o controle de *Euphorbia heterophylla*, as misturas de glyphosate com lactofen ou com flumetsulam foram inferiores aos demais tratamentos. Em relação à *Galinsoga parviflora*, *Amaranthus viridis* e *Digitaria horizontalis* todos os tratamentos apresentaram controles eficientes e semelhantes entre si. Para *Brachiaria plantaginea* as misturas de glyphosate com chlorimuron ou com flumetsulam foram inferiores aos demais tratamentos, sugerindo um efeito de antagonismo em relação ao glyphosate isolado, o qual resultou em 100% de controle, em qualquer uma das doses isoladas avaliadas. Os autores concluem que as condições observadas neste experimento não justificariam o uso da mistura de glyphosate com outros herbicidas para o melhor controle das plantas daninhas presentes, pois, além de não se observar melhor eficiência nas misturas, em alguns casos ocorreu ainda antagonismo.

Com relação à seletividade para a variedade CD 214 RR, a ordem decrescente de fitotoxicidade das misturas foi lactofen, fomesafen, chlorimuron, imazethapyr, flumetsulam, diclosulam e cloransulam. Os sintomas para lactofen foram os mesmos observados costumeiramente na soja convencional. Já para as misturas de glyphosate com chlorimuron, imazethapyr, fomesafen, e principalmente com flumetsulam e diclosulam os sintomas foram superiores aos comumente observados em soja convencional.

4. Misturas em Tanque com Nutrientes

Há vários relatos na literatura de cátions divalentes, trivalentes e alguns monovalentes que podem ser encontrados em águas “duras” antagonizando a eficiência de glyphosate. Isto ocorre, de modo geral, porque o glyphosate, como muitos outros ácidos fosfônicos, age como um agente quelante, e forma complexos estáveis com cátions metálicos divalentes e trivalentes. A eficiência do glyphosate é reduzida porque os complexos metal-glyphosate reduzem a absorção ou a translocação para os tecidos tratados (Bernards et al., 2005c).

Os efeitos das águas “duras” são variáveis, entre outros fatores, em função do tipo de cátion presente, o pH da solução, o volume de aplicação, a relação entre a quantidade de glyphosate e o cátion, pela presença de adjuvantes, surfactantes e quelantes.

4.1 Manganês

Nos Estados Unidos, é relatada a ocorrência de deficiência de Mn em soja quando ela é cultivada em solos de pH alto ou de pouco crescimento da raiz, o que pode ocorrer durante períodos mais frios (Thelen & Bernardts, 2006). Uma vez que os sintomas de deficiência de Mn aparecem com frequência próximos da época de aplicação do herbicida em pós-emergência, em soja RR, produtores tendem a preferir misturas em tanque de glyphosate e fertilizantes à base de Mn.

As aplicações foliares de Mn têm apresentado antagonismo na eficiência do glyphosate sobre algumas espécies de plantas daninhas (Bernardts et al., 2005c,a) como *Abutilon theophrasti*, embora para algumas outras plantas avaliadas não tenham sido observados efeitos antagonísticos, como *Setaria faberi* e *Chenopodium album* (Bernardts et al., 2005a). O antagonismo com Mn é intensificado à medida que a dose de Mn é aumentada e que a dose de glyphosate é diminuída (Bernardts et al., 2005c).

O antagonismo do Mn varia em função da fonte do nutriente: por exemplo Mn-EDTA não interfere com o glyphosate; já sulfato de Mn reduz a absorção, a translocação e a eficácia. São mencionados ainda outros trabalhos nos quais há antagonismo de glyphosate com Ca, Fe, Mg e Zn (Bernardts et al., 2005c).

As sugestões para contornar o problema do antagonismo do Mn em mistura com glyphosate apresentadas por Thelen & Bernardts (2006) são: se a pressão de plantas daninhas for baixa, usar Mn na forma de quelatos, junto com sulfato de amônio; se for alta, usar em aplicações separadas.

Reduções no controle causadas pelo Mn puderam também ser superadas para algumas espécies de plantas daninhas com o aumento da dose de glyphosate, mas o controle de *Chenopodium album* foi efetivo com qualquer dose de glyphosate (Bailey et al., 2002).

Staton (2007) argumenta que para evitar o antagonismo do glyphosate com sulfato de manganês, o método mais seguro é fazer aplicações separadas, aplicando sempre o manganês antes do glyphosate. Se houver necessidade de fazer mistura em tanque, usar o manganês na forma quelatada (EDTA-Mn). Recomendam também observar a formulação de glyphosate: caso não contiver surfactante, adicionar surfactante não iônico a 0,25% v/v. Mesmo para as formulações que contém surfactante, adicionar 0,25% v/v de surfactante não iônico pode melhorar a performance sob condições adversas. Ao testar diversos condicionadores de água, concluíram que a melhor opção foi o sulfato de amônio puro.

4.2 Nitrogênio

Pedrinho Junior et al. (2002) desenvolveram trabalho com o objetivo de estudar a influência do momento da chuva após a aplicação do herbicida glyphosate isolado e em mistura com adjuvantes (uréia, óleo vegetal ou sulfato de amônio), na dessecação de plantas daninhas, em duas épocas do

ano: inverno de 2000 (junho – agosto) e verão de 2001 (janeiro – março). Concluíram que os resultados podem variar de acordo com a época de utilização do glyphosate, isto é, a utilização de adjuvantes na calda de pulverização não beneficiou o desempenho do glyphosate no controle das plantas daninhas no inverno. Por outro lado, a adição de uréia é uma boa alternativa para o controle de plantas daninhas no verão, em situações sujeitas à chuva até duas horas após a aplicação.

O sulfato de amônio aumenta a toxicidade do glyphosate por neutralizar o antagonismo decorrente do sódio e do cálcio. A adição de sulfato de amônio na calda previne o antagonismo ocasionado ao glyphosate pelos íons presentes na água, evitando formação de sais de cálcio e de magnésio de glyphosate, os quais são pouco absorvidos pelas plantas. O efeito do sulfato de amônio é superior ao do nitrato de amônio (Vargas & Roman, 2006).

O acréscimo de sulfato de amônio à calda aumentou a eficácia, absorção e a translocação de glyphosate nas misturas com Mn (Bernards et al., 2005a).

Bradley et al. (2000) concluíram que a aplicação de glyphosate ($0,43 \text{ kg ha}^{-1}$) + sulfato de amônio resultou em maior controle do sorgo do que o glyphosate isolado. No entanto, quando o glyphosate foi aplicado a $0,86 \text{ kg ha}^{-1}$, adição de sulfato de amônio não aumentou o controle do sorgo. A reduzida atividade do glyphosate a $0,43 \text{ kg ha}^{-1}$ na ausência de sulfato de amônio ocorreu provavelmente devido à abundância de cátions na água, que associados às moléculas de glyphosate acabaram reduzindo a absorção pelas plantas.

Tao et al. (2007) também relatam que os ingredientes inertes da formulação de glyphosate (surfactantes catiônicos, NH_4 ou K) contribuíram para o sinergismo deste herbicida quando em mistura com bentazon.

4.3 Outras misturas com nutrientes

Não se observou nenhuma interação entre boro, diflubenzuron e glyphosate, em termos de injúria e de produtividade de soja RR (Prostko et al., 2003).

Brighenti et al. (2006) realizaram dois experimentos com o objetivo de avaliar o controle de plantas daninhas na dessecação em pré-semeadura da soja e do girassol, por meio de aplicações de herbicidas dessecantes, isolados ou em combinação com boro, bem como a resposta destas culturas à aplicação deste micronutriente. Nas parcelas foram testados os tratamentos herbicidas para dessecação, e as subparcelas dos dois experimentos foram constituídas pela ausência ou presença de B, junto à calda de pulverização, utilizando como fonte o ácido bórico [H_3BO_3 - 17% B]. A adição de ácido bórico à calda de pulverização não prejudicou o controle das plantas daninhas pelos tratamentos dessecantes que continham glyphosate, mas prejudicou o tratamento com a mistura formulada de paraquat + diuron.

Concluíram que é viável a aplicação de herbicidas dessecantes e ácido bórico, controlando as plantas daninhas em pré semeadura e aumentando o teor de B no solo e nas plantas de soja e de girassol.

Sódio e cálcio antagonizam o glyphosate pela formação de sais. A formação de sais, embora não afete a retenção do produto pelas folhas, reduz a absorção, independente do surfactante utilizado (Nalewaja et al., 1996).

De forma geral, a mistura de fontes de nutrientes para aplicação via foliar só deve ser efetuada mediante resultados de pesquisa que comprovem a não ocorrência de antagonismo da atividade de glyphosate no controle de plantas daninhas.

5. Considerações Finais

Não há, à priori, ainda, uma forma de antever a resposta de misturas em tanque de glyphosate com outros herbicidas. Este fato se deve ao fato das respostas variarem em função da formulação de glyphosate empregada, do tipo e formulação dos outros herbicidas agregados à mistura, da época de aplicação em relação ao estágio de desenvolvimento da planta daninha, das doses empregadas e do grau de dificuldade de controle da espécie em questão pelo glyphosate.

O fato de uma mistura antagonizar a eficácia do glyphosate para uma determinada espécie de planta daninha não significa que o mesmo comportamento será observado para outras espécies, podendo, inclusive, ocorrer o contrário, isto é, um efeito sinérgico. Desta forma, passam a ser necessárias informações precisas dos efeitos das misturas sobre cada espécie de importância do complexo de plantas daninhas de uma determinada área para se fazer a análise da relação custo/benefício. Tais informações só podem ser obtidas pela condução de experimentos em condições que devem ser as mais próximas possíveis daquela condição que necessita ser manejada no campo.

Contudo, a grande maioria dos trabalhos descritos nesta revisão aponta no sentido de que há maior estabilidade em relação ao controle quando são utilizadas doses mais elevadas de glyphosate nas misturas. Neste caso, existe uma tendência de que sejam minimizados os efeitos negativos causados pelo antagonismo de algumas misturas em tanque. Além disto, várias espécies de plantas daninhas podem não ser convenientemente controladas com a utilização de glyphosate isolado. Nestes casos, as misturas realmente representam um benefício em termos de controle, ficando as possíveis questões de antagonismo de outros herbicidas ao glyphosate restritas àquelas espécies onde o produto tem maior eficácia.

A compilação das informações indica que a utilização de glyphosate em mistura com outros herbicidas em aplicações para dessecação antecedendo

o plantio das culturas na maioria dos casos é benéfica. Nesta situação, normalmente ocorrem plantas de difícil controle pelo glyphosate em avançado estágio de desenvolvimento. Como as doses de glyphosate nestas situações são mais elevadas, a probabilidade de ocorrência de antagonismo é menor e no cômputo líquido o benefício acaba sendo maior.

Já nas aplicações em pós-emergência da soja RR, o uso de misturas representa uma importante opção para o controle das plantas daninhas mais tolerantes ao glyphosate, para os casos comprovados de biótipos resistentes e para os casos de áreas com diversos fluxos de emergência de plantas daninhas. Nestes casos, uma possibilidade viável é a realização de aplicações sequenciais. Por outro lado, a ocorrência do antagonismo para o controle das demais plantas daninhas pode ser mais frequente, visto que normalmente as doses de glyphosate empregadas são mais baixas. Além disto, a fitointoxicação provocada pelas misturas, que é usualmente maior do que aquela provocada pelo glyphosate isolado, pode levar à redução do controle cultural, imposto pela cultura, resultando em menores eficiências, mesmo que inicialmente o controle tenha sido superior nas misturas em comparação com glyphosate isolado.

Também é fato que o controle de plantas daninhas (principalmente espécies de folhas largas mais problemáticas) pelo glyphosate isolado em aplicações após a emergência das lavouras transgênicas é mais eficiente quando é realizado com as plantas em estádios iniciais de desenvolvimento (duas a quatro folhas). Em alguns casos, mesmo o glyphosate sendo eficiente para o controle de plantas daninhas em estádios mais avançados, a interferência precoce pode já ter provocado reduções do potencial de produtividade da cultura. Assim, quando da realização da dessecação que antecede o plantio direto das culturas, a utilização de herbicidas com efeito residual pode representar uma excelente opção para prevenir a interferência precoce e permitir a aplicação do glyphosate em épocas mais tardias do ciclo da cultura. As aplicações de glyphosate realizadas mais próximas ao fechamento reduzem as injúrias para a cultura, maximizando o efeito de controle cultural, o que pode resultar em menor número de aplicações durante o ciclo da cultura. Neste caso, ainda existe o benefício adicional de, levando-se em conta o efeito residual no início do ciclo, postergar-se a emergência dos fluxos seguintes de plantas daninhas, o que resulta no fato de que as aplicações de glyphosate acabam sendo realizadas com as plantas daninhas ainda em um estágio precoce de desenvolvimento, potencializando a ação do produto. Finalmente, a utilização de misturas de herbicidas na dessecação, tendo ação residual ou não, é uma importante ferramenta para o controle de plantas daninhas tolerantes e resistentes ao glyphosate nas culturas RR.

Apesar dos riscos de antagonismo nas misturas de glyphosate com outros herbicidas, as misturas se justificam em diversas situações, tais como quando existe a necessidade de uma dessecação mais veloz antecedendo o

plântio direto, para controlar e prevenir a seleção de espécies tolerantes e resistentes, pelo desejo de obter-se atividade residual no início do ciclo suficiente para reduzir a interferência precoce e a emergência de novos fluxos de infestação e também por representarem uma economia nos custos operacionais, pela menor número de aplicações.

Por enquanto, a utilização de misturas em tanque de herbicidas contendo glyphosate em pós-emergência da soja RR só deve ser feita em áreas onde comprovadamente a eficiência do glyphosate não é satisfatória. Portanto, sua utilização em larga escala ainda carece da geração de dados que permitam o seu uso com segurança. Porém, como visto, nas misturas onde o glyphosate tem sido utilizado em doses mais altas, os benefícios são mais evidentes. Isto demonstra que as misturas de herbicidas com glyphosate apresentam uma maior segurança para utilização em áreas de dessecação pré-plantio das culturas ou em jato dirigido em culturas perenes e anuais cultivadas com maior espaçamento entre linhas.

Referências

- Albert, L.H.B.; Nicolai, M.; Carvalho, S.J.P.; Christoffoleti, P.J. & Karam, D., Glyphosate em mistura com herbicidas alternativos para o manejo de *Spermacoce latifolia* AUBL. *Boletim Informativo Ciência das Plantas Daninhas*, 10:224, 2004.
- Alcântara, E.N. & Silva, F.M.A., Controle de plantas daninhas em cafeeiros com metsulfuron e em mistura com glyphosate. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 477.
- Alves, L.W.R. & Guimarães, R.C., Eficácia dos herbicidas sulfentrazone, carfentrazone e flumioxazin associados ao glyphosate para controle de plantas daninhas na cultura do cafeeiro. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 471.
- Bailey, W.A.; Poston, D.H.; Wilson, H.P. & Hines, T.E., Glyphosate interactions with manganese. *Weed Technol*, 16:792-799, 2002.
- Bernards, M.L.; Thelen, K.D. & Penner, D., Glyphosate efficacy is antagonized by manganese. *Weed Technol*, 19:27-34, 2005a.
- Bernards, M.L.; Thelen, K.D.; Penner, D.; Muthukumar, R.B. & McCracken, J.L., Glyphosate interaction with manganese in tank mixtures and its effect on glyphosate absorption and translocation. *Weed Sci*, 53:787-794, 2005c.
- Bizzi, A.F. & Andres, A., Eficiência do herbicida chlorimuron-ethyl aplicado no sistema desseque e plante na cultura da soja. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 444.

- Bizzi, A.F.; Roman, E.S. & Andres, A., Sistema desseque e plante na cultura da soja. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 443.
- Boerboom, C.M.; Doll, J.D.; Flashinski, C.R.; Grau, C.R. & Wedberg, J.L., Pest Management in Wisconsin Crop Fields. Bulletin, Cooperative Extension Services, Madison, USA, 1999. 196 p.
- Bradley, K., Evaluation of the utility of glyphosate tank-mix partners in Roundup Ready soybean. Field Report Day, Greenley Memorial Research Center, 2004. Disponível em <http://aes.missouri.edu/greenley/fieldday/2004/page13.stm>. Consultado em 13/06/2007.
- Bradley, P.R.; Johnson, W.G. & Smeda, R.J., Response of sorghum (*Sorghum bicolor*) to atrazine, ammonium sulphate, and glyphosate. *Weed Technol*, 14:15-18, 2000.
- Brighenti, A.M.; Castro, C.; Menezes, C.C. & Oliveira F. A.; Fernandes, P.B., Aplicação simultânea de dessecantes e boro no manejo de plantas daninhas e na nutrição mineral das culturas de soja e girassol. *Planta Daninha*, 24:797-804, 2006.
- Brighenti, A.M.; Da Silva, J.F.; Lopes, N.F.; Cardoso, A.A. & Ferreira, L.R., Controle químico da losna em plantio direto de trigo. *Planta Daninha*, 12:3-8, 1994.
- Bueno, A.F.; Carvalho, J.C.; Nonino, H.L.; Camillo, M.F. & Guimarães, J.R., Combinação de diclosulam e glyphosate + 2,4-d-amina na dessecação de plantas daninhas em soja resistente à glyphosate. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 392.
- Burke, I.C.; Koger, C.H.; Reddy, K.N. & Wilcut, J.W., Reduced translocation is the cause of antagonism of glyphosate by MSMA in browntop millet (*Brachiaria ramosa*) and palmer amaranth (*Amaranthus palmerii*). *Weed Technol*, 21:166-170, 2007.
- Buzatti, W.J.S. & Gazziero, D.P., Manejo com glyphosate + 2,4-D em diferentes épocas no plantio da soja RR. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 416.
- Carreira, S.A.M.; Constantin, J.; Marchiori Jr., O.; Oliveira Jr., R.S. & Pagliari, P.H., Misturas para a operação de aplique-plante para a cultura da soja (*Glycine max* L. Merrill). In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 446.

- Carvalho, F.T.; Mendonça, M.R.; Peruchi, M. & Palazzo, R.R.B., Eficácia de herbicidas no manejo de *Euphorbia heterophylla* para o plantio direto de soja. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 1:159-165, 2000.
- Carvalho, F.T.; Mendonça, M.R.; Peruchi, M. & Palazzo, R.R.B., Eficácia de herbicidas no manejo de *Euphorbia heterophylla* para o plantio direto de milho. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 2:65-71, 2001.
- Carvalho, J.A.; Ribeiro, F.F.; Brito, C.H. & Cunha, J.R., Eficácia e seletividade da mistura tripla de flumioxazin, diclosulam e glyphosate na dessecação para semeadura da soja. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 445.
- Cavenaghi, A.L.; Castro, R.D.; Guimarães, S.C.; Silva, H.J. & Ribeiro, P.C., Avaliação de programas de manejo de plantas daninhas em soja transgênica. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 399.
- Christoffoleti, P.J.; Montezuma, M.C.; Galli, A.J.; Sperandio, P.H.; Moreira, M.S. & Nicolai, M., Herbicidas alternativos para o controle de biótipos de *Conyza bonariensis* e *C. canadensis* supostamente resistentes ao herbicida glyphosate. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 553.
- Cobucci, T.; Portela, C.M.O.; Silva, W. & Neto Monteiro, A., Efeito residual de herbicidas em pré-plantio do feijoeiro, em dois sistemas de aplicação em plantio direto e sua viabilidade econômica. *Planta Daninha*, 22:583-590, 2004.
- Colby, S.R., Calculating synergistic and antagonistic responses of herbicide combinations. *Weeds*, 15:20-22, 1967.
- Constantin, J.; Oliveira Jr., R.S.; Martins, M.C.; Lopes, P.V. & Barroso, A.L.L., Dessecação em áreas com grande cobertura vegetal: alternativas de manejo. *Informações Agronômicas Potafós*, 111:7-9, 2005.
- Correia, N.M.; Tambelini, M.V. & Leite, G.J., Seletividade de soja tolerante a glyphosate a diferentes herbicidas aplicados isolados e em misturas. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 181.
- Corrigan, K.A. & Harvey, R.G., Glyphosate with and without residual herbicides in no-till glyphosate-resistant soybean (*Glycine max*). *Weed Technol*, 14:569-577, 2000.

- Costa, E.A.D.; Burga, C.A. & Matallo, M.B., Eficácia de flumioxazin aplicado em associação com glyphosate no controle de plantas daninhas. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 625.
- Culpepper, A.S., Glyphosate-induced weed shifts. *Weed Technol*, 20:277–281, 2006.
- Dirks, J.T.; Johnson, W.G.; Smeda, R.J.; Wiebold, W.J. & Massey, R.E., Reduced rates of sulfentrazone plus chlorimuron and glyphosate in no-till, narrow-row, glyphosate-resistant *Glycine max*. *Weed Sci*, 48:618–627, 2000.
- Ellis, J.M. & Griffin, J.L., Glyphosate and broadleaf herbicide mixtures for soybean (*Glycine max*). *Weed Technol*, 17:21–27, 2003.
- Fernandes, M.F.; Paula, J.M.; Silva, O.A.B. & Vieira, S.S., Eficiência da mistura de 2,4-D e glyphosate na dessecação sequencial na cultura da soja RR. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 413.
- Ferri, M.V.W. & Eltz, F.L.F., Semeadura direta da cultura de aveia-preta em campo nativo dessecado com herbicidas. *Planta Daninha*, 16:127–136, 1998.
- Flint, J.L.; Cornelius, P.L. & Barret, M., Analyzing herbicide interactions: a statistical treatment of Colby´s method. *Weed Technol*, 2:304–309, 1988.
- Galli, A.J.B. & Carvalho, J.E.B., Misturas de herbicidas para o controle de plantas daninhas anuais na cultura de citrus (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck). *Planta Daninha*, 8:45–51, 1985.
- Gazziero, D.L.P., Utilização de diclosulam no programa de controle de plantas daninhas em soja resistente ao glyphosate. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 417.
- Gazziero, D.P., *Manejo de plantas daninhas em áreas cultivadas com soja geneticamente modificada para resistência ao glyphosate*. Tese de doutorado, Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2003. 143 p.
- Grey, T., Utility of residual herbicides in no-till double-crop glyphosate-resistant soybean production. *Crop Management (Online)*, 2007. Disponível em <http://199.86.26.72/sub/cm/research/2007/residual/table.asp>.
- Heatherly L. G. Reddy, K.N. & Spurlock, S.R., Weed management in glyphosate-resistant and non-glyphosate-resistant soybean grown continuously and in rotation. *Agron J*, 97:568–577, 2005.

- Hutchinson, P.J.S.; Tonks, D.J. & Beutler, B.R., Efficacy and economics of weed control programs in glyphosate-resistant potato (*Solanum tuberosum*). *Weed Technol*, 17:854–865, 2003.
- Hydrick, D.E. & Shaw, D.R., Effects of tank-mixture combinations of non-selective foliar and selective foliar-applied herbicides on three weed species. *Weed Technol*, 8:129–133, 1994.
- Jarentchuck, C.C.; Constantin, J.; Oliveira Jr., R.S.; Biffe, D.F.; Alonso, D.G. & Arantes, J.G.Z., Efeito de sistemas e manejo sobre a velocidade de dessecação, infestação inicial de plantas daninhas e desenvolvimento e produtividade da cultura da soja. *Acta Sci Agron*, 30:449–455, 2008.
- Koger, C.H.; Burke, I.C.; Donnie, K.M.; Kendig, J.A.; Reddy, K.N. & Wilcut, J.W., MSMA antagonizes glyphosate and glufosinate efficacy on broadleaf and grass weeds. *Weed Technol*, 21:159–165, 2007.
- Kudsk, P. & Mathiassen, S.K., Joint action of amino acid biosynthesis-inhibiting herbicides. *Weed Res*, 44:313–322, 2003.
- Matallo, M.B.; Costa, E.A.D. & Burga, C.A., Eficiência do herbicida flumioxazin aplicado em associação com glyphosate no controle de plantas daninhas sob diferentes simulações de molhamento. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 626.
- Menezes, C.C.; Procópio, S.O.; Pires, F.R.; Barroso, A.L.L.; Cargnelluti Filho, A.; Carmo, E.L. & Caetano, J.O., Eficácia de imazethapyr e chlorimuron-ethyl em aplicações de pré-semeadura da cultura da soja. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 379.
- Meschede, D.K.; Oliveira Jr., R.S.; Constantin, J. & Scapim, C.A., Período crítico de interferência de *Euphorbia heterophylla* na cultura da soja sob baixa densidade de semeadura. *Planta Daninha*, 20:381–387, 2002.
- Meschede, D.K.; Oliveira Jr., R.S.; Constantin, J. & Scapim, C.A., Período anterior à interferência de plantas daninhas em soja: estudo de caso com baixo estande e testemunhas duplas. *Planta Daninha*, 22:239–246, 2004.
- Monquero, P.A.; Christoffoleti, P.J.; Osuna, M.D. & De Prado, R.A., Absorção, translocação e metabolismo do glyphosate por plantas tolerantes e suscetíveis a este herbicida. *Planta Daninha*, 22:445–451, 2004.
- Monquero, P.A.; Christoffoleti, P.J. & Santos, C.T.D., Glyphosate em mistura com herbicidas alternativos para o manejo de plantas daninhas. *Planta Daninha*, 19:375–380, 2001.
- Moreira, M.S.; Nicolai, M.; Carvalho, S.J.P. & Christoffoleti, P.J., Resistência de *Conyza canadensis* e *C. bonariensis* ao herbicida glyphosate. *Planta Daninha*, 25:157–164, 2007.

- Nalewaja, J.D.; Devilliers, B. & Matysiak, R., Surfactant and salt affect glyphosate retention and absorption. *Weed Res*, 36:241–247, 1996.
- Nonino, H.L.; Carvalho, J.C. & Damico, J.C., Programas de manejo com glyphosate e 2,4-D amina em combinações com diclosulam na dessecação de plantas daninhas na cultura da soja resistente à glyphosate. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 394.
- Norris, J.L.; Shaw, D.R. & Snipes, C.E., Weed control from herbicide combinations with three formulations of glyphosate. *Weed Technol*, 15:552–558, 2001.
- Oliveira, A.R.; Freitas, S.P. & Vieira, H.D., Controle químico de trapoeiras na região norte do estado do Rio de Janeiro. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 629.
- Osipe, R.; Sanches, W.; Zandonade, D.; Licorini, L.R. & Bueno, A.R., Comportamento do herbicida Alteza aplicado no manejo da cultura da soja. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 412.
- O'Sullivan, P.A. & O'Donovan, J.T., Interaction between glyphosate and various herbicides for broadleaved weed control. *Weed Res*, 20:255–260, 1980.
- Pedrinho Junior, A.F.F.; Piva, F.M.; Martini, G.; Felici, G.V. & Durigan, J.C., Influência da chuva na eficácia do glyphosate em mistura com adjuvantes na dessecação de plantas daninhas. *Planta Daninha*, 20:263–271, 2002.
- Penckowski, L.H. & Podolan, M.J., Mistura de tanque de herbicidas latifolicidas com glyphosate no controle de erva-quente em soja Roundup Ready. Relatório Interno de Pesquisa, Fundação ABC, Setor de Herbologia, 2007a. 4 p.
- Penckowski, L.H. & Podolan, M.J., Misturas de tanque de herbicidas latifolicidas com glyphosate no controle de plantas daninhas em soja Roundup Ready. Relatório Interno de Pesquisa, Fundação ABC, Setor de Herbologia, 2007b. 8 p.
- Penckowski, L.H. & Rocha, D.C., *Guia ilustrativo de identificação e controle de espécies de trapoeiras*. Castro, PR: Fundação ABC, 2006.
- Pereira, E.S.; Velini, E.D.; Carvalho, L.R. & Maimoni-Rodella, R.C.S., Avaliações qualitativas de plantas daninhas na cultura da soja submetida aos sistemas de plantio direto e convencional. *Planta Daninha*, 18:207–216, 2000.

- Price, A.J.; Wilcut, J.W. & Cranmer, J.R., Flumioxazin preplant burn-down weed management in strip-tillage cotton (*Gossypium hirsutum*) planted into wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technol*, 16:762-767, 2002.
- Prostko, E.P.; Norworthy, J.K. & Raymer, P.A., Soybean (*Glycine max*) response to glyphosate, diflufenzuron, and boron combinations. *Weed Technol*, 17:186-189, 2003.
- Ramos, H.H. & Durigan, J.C., Avaliação da eficiência da mistura pronta de glyphosate + 2,4-D no controle da *Commelina virginica* L. em citros. *Planta Daninha*, 14:22-41, 1996.
- Ramos, H.H. & Durigan, J.C., Efeito do armazenamento da calda na eficácia de herbicidas aplicados em: I. pós-emergência. *Planta Daninha*, 16:175-185, 1998.
- Rezende, P.M. & Alcântara, E.N., Aplicação de flumioxazin isolado ou em mistura na dessecação de plantas daninhas no plantio direto da soja. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 431.
- Ribeiro, P.C.; Carvalho, J.C. & Nonino, H.L., Benefício da dessecação sequencial e da adição de 2,4-D amina no controle de trapoeraba e erva-quente em soja resistente ao glyphosate. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 403.
- Rizzardi, M.A.; Vargas, L.; Roman, E.S.; Lamb, T.D.; Johann, L.B. & Toledo, R.E.B., Controle de azevém resistente ao herbicida glyphosate em pré-semeadura da cultura da soja. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006b. p. 551.
- Rizzardi, M.A.; Vargas, L.; Toledo, R.E.B.; Lamb, T.D. & Johann, L.B., Controle de azevém resistente ao herbicida glyphosate em pomares de maçã. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006a. p. 550.
- Rodrigues, B.N.; Lima, J.; Yada, I.F.U. & Fornarolli, D.A., Utilização de acetochlor e atrazine aplicados em mistura de tanque com desseccantes no sistema de plantio direto. *Planta Daninha*, 18:293-299, 2000.
- Rodrigues, B.N.; Moda-Cirino, V.; Fornarolli, D.A.; Moraes, V.J. & Caetano, E., Controle de plantas daninhas em soja geneticamente modificada resistente ao glyphosate, no sistema de plantio direto, em cobertura morta de milho. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002a. p. 229.

- Rodrigues, B.N.; Moda-Cirino, V.; Fornarolli, D.A.; Moraes, V.J. & Caetano, E., Controle de plantas daninhas em soja geneticamente modificada resistente ao glyphosate, no sistema de plantio direto, em cobertura morta de pousio. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002b. p. 230.
- Rodrigues, B.N.; Moda-Cirino, V.; Fornarolli, D.A.; Moraes, V.J. & Caetano, E., Controle de plantas daninhas em soja Roundup Ready, no sistema de plantio direto em cobertura morta de trigo. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002c. p. 231.
- Roman, E.S., Eficácia de herbicidas na dessecação e no controle residual de plantas daninhas no sistema desseque e plante. *Planta Daninha*, 3:45-49, 2002.
- Ronchi, C.P.; A., S.A.; Ferreira, L.R.; Miranda, G.V. & Terra, A.A., Carfentrazone-ethyl, isolado e associado a duas formulações de glyphosate no controle de duas espécies de trapoeraba. *Planta Daninha*, 20:103-113, 2002a.
- Ronchi, C.P.; Silva, A.A.; Miranda, G.V.; Ferreira, L.R. & Terra, A.A., Misturas de herbicidas para o controle de plantas daninhas do gênero *Commelina*. *Planta Daninha*, 20:311-318, 2002b.
- Rossin, R.; Martins, B.A.B.; Carvalho, S.J.P.; Ribeiro, D.N.; Moreira, M.S. & Christoffoleti, P.J., Influência do momento da aplicação do glyphosate e do uso do clomazone na dessecação no controle de plantas daninhas em soja geneticamente modificada. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBCPD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 378.
- Santos, I.C.; Ferreira, F.A.; Silva, A.A.; Miranda, G.V. & Santos, L.D.T., Eficiência do 2,4-D aplicado isoladamente e em mistura com glyphosate no controle da trapoeraba. *Planta Daninha*, 20:299-309, 2002.
- Scott, R.; Shaw, D.R. & Barrentine, W.L., Glyphosate tank mixtures with SAN 582 for burndown or postemergence applications in glyphosate-tolerant soybean (*Glycine max*). *Weed Technol*, 12:23-26, 1998.
- Shaw, D.R. & Arnold, J.C., Weed control from herbicide combinations with glyphosate. *Weed Technol*, 16:1-6, 2002.
- Souza, L.S.; Correa, T.M.; Mauri, F.D. & Losasso, P.H.L., Eficiência do glifosato potássico em mistura com CGA 276854 no controle da trapoeraba na cultura do café. In: *Resumos do 23º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Londrina, PR: SBCPD/Embrapa Clima Temperado, 2002. p. 465.

- Starke, R.J. & Oliver, L.R., Postemergence weed control with glyphosate in combination with chlorimuron, fomesafen, and sulfentrazone. *Proc South Weed Sci Soc*, 49:55, 1996.
- Starke, R.J. & Oliver, L.R., Interaction of glyphosate with chlorimuron, fomesafen, imazethapyr, and sulfentrazone. *Weed Sci*, 46:652-660, 1998.
- Staton, M., Maximizing glyphosate performance. Soybean Facts, Michigan State University Extension, 2007. Disponível em http://www.msue.msu.edu/workspaces/one.cfm?object_id=413628. Consultado em: 11/06/2007.
- Stone, A.E.; Peeper, T.F. & Kelley, J.P., Efficacy and acceptance of herbicides applied for field bindweed (*Convolvulus arvensis*) control. *Weed Technol*, 19:148-153, 2005.
- Suwunnamek, U. & Parker, C., Control of *Cyperus rotundus* with glyphosate: the influence of ammonium sulfate and other additives. *Weed Res*, 15:13-19, 1975.
- Tao, B.; Zhou, J.; Messersmith, C.G. & Nalewaja, J.D., Efficacy of glyphosate plus bentazone or quizalofop on glyphosate-resistant canola or corn. *Weed Technol*, 21:97-101, 2007.
- Taylor-Lovell, S.; Wax, L.M. & Bollero, G., Preemergence flumioxazin and pendimethalin and postemergence herbicide systems for soybean (*Glycine max*). *Weed Technol*, 16:502-511, 2002.
- Tharp, B.E. & Kells, J.J., Residual herbicides used in combination with glyphosate and glufosinate in corn (*Zea mays*). *Weed Technol*, 16:274-281, 2002.
- Thelen, K. & Bernards, M., Tips to avoid weed control antagonism when applying Mn fertilizer with glyphosate. *Field Crop Advisory Team Alert Newsletter*, 21, 2006.
- Timossi, P.C. & Durigan, J.C., Manejo de convulvuláceas em dois cultivares de soja semeada diretamente sob palha residual de cana crua. *Planta Daninha*, 24:91-98, 2006.
- Tofoli, G.R.; Nonino, H.L. & Carvalho, J.C., Utilização de diclosulam em associação com glyphosate + 2,4-D amina na dessecação de plantas daninhas em soja resistente ao glyphosate. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBPCD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 402.
- Valente, T.O. & Cavazzana, M.A., Efeito residual de chlorimuron-ethyl aplicado em mistura com glyphosate na dessecação de plantas daninhas. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 1:173-178, 2000.
- Valente, T.O.; Sousa, F. & Stradiotto, A., Tolerância da soja geneticamente modificada à mistura de herbicidas. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBPCD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 180.

- Vangessel, M.J.; Ayeni, A.O. & Majek, B.A., Glyphosate in double-crop no-till glyphosate-resistant soybean: role of preplant applications and residual herbicides. *Weed Technol*, 15:703–713, 2001.
- Vanlieshout, L.A. & Loux, M.M., Interactions of glyphosate with residual herbicides in no-till soybean (*Glycine max*) production. *Weed Technol*, 14:480–487, 2000.
- Vargas, L. & Roman, E.S., Herbicidas e a qualidade química da água usada como diluente. Documentos Online, EM-BRAPA Trigo, Passo Fundo, RS, 2006. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do57.htm.
- Vidal, R.A.; Lamego, F.P.; Kalsing, A. & Goulart, I., Associação de herbicidas com glyphosate para controle de convulváceas em pós-emergência. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBPCD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 472.
- Vidal, R.A.; Machry, M.; Hernandez, G.C. & Fleck, N.G., Antagonismo na associação de glyphosate e triazinas. *Planta Daninha*, 21:301–306, 2003.
- Vidrine, P.R.; Griffin, J.L.; Jordan, D.L. & Miller, D.K., Postemergence weed control in soybeans utilizing glyphosate and chlorimuron. *Proc South Weed Sci Soc*, 50:175, 1997.
- Werlang, R.C., Manejo de plantas daninhas com o herbicida sulfentrazone na dessecação em sistemas de produção utilizando soja transgênica em semeadura direta. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBPCD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006a. p. 408.
- Werlang, R.C., Manejo de plantas daninhas com o herbicida sulfentrazone na dessecação em sistemas de produção de soja transgênica. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBPCD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006b. p. 409.
- Werlang, R.C. & Silva, A.A., Interação de glyphosate com carfentrazone-ethyl. *Planta Daninha*, 20:93–102, 2002.
- Wiese, A.F.; Salisbury, C.D. & Bean, B.W., Downy brome (*Bromus tectorum*), jointed goatgrass (*Aegilops cylindrica*), and horseweed (*Conyza canadensis*) control in fallow. *Weed Technol*, 9:249–254, 1995.
- Zagonel, J., Épocas e modos de manejo de plantas daninhas em pré-semeadura da cultura da soja. In: *Resumos do 25º Congresso Brasileiro da Ciência das Plantas Daninhas*. Brasília, DF: SBPCD/UNB/Embrapa Cerrados, 2006. p. 388.

Este livro é composto por uma sequência de capítulos que abordam assuntos que constituem a base do programa de uma disciplina ministrada para cursos de graduação em Agronomia. O público-alvo são os alunos de graduação e de pós-graduação na área de Ciência das Plantas Daninhas. O conteúdo enfoca como as plantas daninhas se estabelecem e interagem com as plantas cultivadas (aquelas de interesse econômico), além de discutir os métodos de controle e de se aprofundar em aspectos do controle destas plantas com o uso de herbicidas (pesticidas que são capazes de controlar as plantas sem afetar as culturas).

TÍTULO

AUTOR

TÍTULO	AUTOR
Biologia de plantas daninhas	Alexandre Magno Brighenti e Maurílio Fernandes de Oliveira
Bancos de sementes e mecanismos de dormência em sementes de plantas daninhas	Alessandro de Lucca e Braccini
Métodos de manejo	Jamil Constantin
Controle biológico: aplicações na área de Ciência das Plantas Daninhas	Dauri José Tessmann
Alelopatia	Nádja de Moura Pires e Valter Rodrigues de Oliveira
Introdução ao controle químico	Rubem Silvério de Oliveira Jr.
Mecanismos de ação de herbicidas	Rubem Silvério de Oliveira Jr.
Resistência de plantas daninhas a herbicidas	Miriam Hiroko Inoue e Rubem Silvério de Oliveira Jr.
Absorção e translocação de herbicidas	Rubem Silvério de Oliveira Jr. e Marcos Antonio Bacarin
Seletividade de herbicidas para culturas e plantas daninhas	Rubem Silvério de Oliveira Jr. e Miriam Hiroko Inoue
Comportamento de herbicidas no ambiente	Maurílio Fernandes de Oliveira e Alexandre Magno Brighenti
Misturas de herbicidas contendo glyphosate: situação atual, perspectivas e possibilidades.	Jamil Constantin e Rubem Silvério de Oliveira Jr.

