

CAPÍTULO 5 – RESISTÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS

A resistência de plantas daninhas a herbicidas é, nos dias de hoje, a principal preocupação dos estudiosos em manejo de plantas daninhas, por três motivos, ao menos: (i) o controle químico é o método mais utilizado, de maneira geral, no controle de plantas daninhas; (ii) para muitas culturas de interesse econômico, há limitação do número de herbicidas registrados, sendo que alguns já apresentam biótipos de plantas daninhas resistentes; e (iii) o descobrimento e o desenvolvimento de novas moléculas herbicidas é lento e não acompanha a evolução da resistência das plantas daninhas no campo.

5.1. CONCEITOS

Resistência é a capacidade adquirida por um grupo de indivíduos dentro de uma população (biótipo) em sobreviver e se reproduzir após exposição ao herbicida que controla outros indivíduos da mesma espécie; diferindo da tolerância que é a capacidade inata da espécie em sobreviver e se reproduzir após exposição ao herbicida (Christofolleti et al., 2008). Assim, pode-se dizer que quando uma planta daninha é tolerante a determinado herbicida, qualquer indivíduo dessa espécie, seja onde for, também será tolerante ao produto; no entanto, quando uma planta daninha é resistente, um ou mais grupos de plantas, em um local ou vários locais, apresentam indivíduos que não morrem e se reproduzem normalmente, deixando descendentes, após serem expostos ao herbicida, enquanto outros grupos de plantas da mesma espécie morrem após a exposição ao produto.

A resistência de plantas daninhas a herbicidas pode ser dividida em três tipos:

- a) *Simples ou Isolada* – quando determinada planta daninha é resistente a apenas um herbicida específico de determinado mecanismo de ação. Exemplo de o capim-amargoso (*Digitaria insularis*) resistente a glyphosate, Inibidor da EPSPs;
- b) *Cruzada* – quando determinada planta daninha é resistente a dois ou mais herbicidas do mecanismo de ação. Por exemplo, o papuã (*Urochloa plantaginea*) resistente a fluzifop-p-buthyl, sethoxydim e fenoxaprop-p-ethyl, todos Inibidores da ALS;

- c) *Múltipla* – quando determinada planta daninha é resistente a dois ou mais herbicidas de mecanismos de ação distintos. Por exemplo, o leiteiro (*Euphorbia heterophylla*) resistente a imazethapyr (Inibidor de ALS) e fomesafen (Inibidor de PROTOX).

5.2. HISTÓRICO

A evolução da resistência de plantas daninhas a herbicidas, provavelmente, ocorre desde que se iniciou o uso extensivo e frequente desses produtos. A primeira constatação de resistência de plantas daninhas a herbicidas ocorreu em 1957, quando biótipos de trapoeraba (*Commelina diffusa*) e cenoura-selvagem (*Daucus carota*), respectivamente nos EUA e no Canadá, resistentes a mimetizadores de auxina foram identificados. Na década de 1970, foram identificados biótipos de cardo (*Senecio vulgaris*) resistentes a simazine e outras triazinas (inibidores de FSII), nos EUA, além de algumas espécies dos gêneros *Amaranthus* e *Chenopodium*, em diferentes países. No final da década de 1990, havia mais de 100 espécies de plantas daninhas resistentes a herbicidas em cerca de 40 países.

A partir da década de 1980, são crescentes os casos de plantas daninhas resistentes a herbicidas. No final de 2012, haviam sido identificados 396 biótipos de plantas daninhas, pertencentes a 210 espécies, com resistência a 148 diferentes herbicidas, pertencentes a 21 dos 25 mecanismos de ação conhecidos, ocorrendo em 63 distintas culturas agrícolas e 61 países. Inibidores da ALS apresentam o maior número de espécies resistentes (129), seguidos por Inibidores do FS II (91), Inibidores da ACCase (42), Mimetizadores de auxina (30), Inibidores do FSI (28), Inibidores da EPSPs (24), Inibidores do arranjo de microtúbulos (11) etc.

No Brasil, o primeiro caso de resistência foi identificado em 1993, no Estado do Mato Grosso do Sul, envolvendo biótipos de picão-preto (*Bidens pilosa*) resistentes a Inibidores da ALS, como chlorimuron-ethyl, imazaquin, imazethapyr, nicosulfuron e pyriithobac-sodium, na cultura da soja. Em 2004, foi identificado o primeiro caso de resistência múltipla de leiteiro (*Euphorbia heterophylla*) a Inibidores de ALS (cloransulam-methyl, diclosulam, flumetsulam, flumiclorac-pentyl, imazethapyr, metsulfuron-methyl e nicosulfuron) e de PROTOX

(acifluorfen-sodium, fomesafen e lactofen), em culturas de milho e soja, no Estado do Paraná. Os últimos casos de plantas daninhas resistentes foram registrados em 2011, envolvendo biótipos de buva (*Conyza sumatrensis*) com resistência simples a Inibidor de ALS (chlorimuron-ethyl) e com resistência múltipla a Inibidores de ALS (chlorimuron-ethyl) e Inibidores de EPSPs (glyphosate), nas culturas de milho e soja. Além desses casos, existem muitos outros relatados entre 1993 e 2011, com 28 biótipos, pertencentes a 20 espécies de plantas daninhas, resistentes a herbicidas de 6 mecanismos de ação distintos (Inibidores de ACCase, ALS, EPSPs, PROTOX, FSII e Mimetizadores de auxina).

5.3. EVOLUÇÃO

A resistência de plantas daninhas evolui em nível populacional através da pressão de seleção exercida por aplicações frequentes de um mesmo herbicida ou herbicidas diferentes do mesmo mecanismo de ação. Mutações genéticas induzidas por herbicidas são pouco prováveis e, caso ocorram, não devem contribuir significativamente para a evolução da resistência em nível populacional.

A pressão de seleção do herbicida induz à seleção natural de biótipos resistentes que podem ocorrer naturalmente no meio de plantas susceptíveis (população susceptível). Cada aplicação do herbicida elimina as plantas susceptíveis e seleciona as plantas resistentes, que se reproduzem ao longo do tempo, alterando o padrão de susceptibilidade da população presente na área. Com isso, as populações que se seguem serão cada vez mais resistentes, podendo chegar a um momento em que quase todos os indivíduos são resistentes (população resistente).

O sucesso da seleção de plantas induzidas pela pressão de seleção dos herbicidas está na alta variabilidade genética das populações de plantas daninhas. Além disso, há outros fatores que afetam a evolução da resistência, sendo divididos em:

- a) *Genéticos* – inerentes aos indivíduos de uma mesma população de planta daninha;
- b) *Bioecológicos* – resultantes da interação as características do indivíduo e a ação do ecossistema sobre ele;
- c) *Agronômicos* – resultantes das práticas de manejo aplicadas ao longo do tempo na área.

5.3.1. Fatores genéticos

A frequência inicial do biótipo resistente (genoma resistente) é um dos principais fatores genéticos que influenciam o tempo de evolução da resistência. Quanto maior for essa frequência, maior a probabilidade de aumentar a quantidade de indivíduos resistentes em menor tempo. Inibidores de ALS apresentam as maiores frequências, sendo que o tempo para seleção da resistência é estimado em 4 anos, por isso há mais casos de resistência envolvendo esses herbicidas.

O tipo de herança genética da resistência e a dominância do gene envolvido na resistência são fatores que influenciam na evolução da resistência de plantas daninhas a herbicidas. Para a maioria dos mecanismos de ação, a resistência é determinada por genes dominantes ou semidominantes, localizados no DNA nuclear (herança nuclear, paterna ou materna, envolvendo recombinação gênica). Assim, os genes são transmitidos via cromossomos para um biótipo susceptível que pode se tornar resistente, independente do tipo de fecundação. No entanto, se a herança for citoplasmática (herança materna apenas, não envolvendo recombinação gênica), localizada em organelas como mitocôndria, complexo de Golgi ou cloroplasto, os caracteres hereditários serão transmitidos apenas pela planta-mãe. Nesse caso, o tipo de fecundação é importante para a evolução da resistência, como será discutido a seguir.

O tipo de fecundação afeta a transmissão dos caracteres hereditários entre plantas susceptíveis e resistentes, sendo dependente do tipo de herança genética, como discutido anteriormente. A herança nuclear independe do tipo de fecundação, autofecundação ou fecundação cruzada, portanto será transmitida aos descendentes. Já para a herança citoplasmática, a transmissão dos caracteres hereditários ocorre apenas com a autofecundação, não havendo transmissão de alelos resistentes entre populações adjacentes. Portanto, a evolução da resistência através da herança citoplasmática é mais lenta que pela herança nuclear.

O número de alelos resistentes é outro fator que afeta a evolução da resistência. Quando a herança é monogênica (expressa por um único gene), a probabilidade e a velocidade de evolução da resistência são maiores, enquanto que na herança poligênica (expressa por dois ou mais genes) são menores.

A adaptação ecológica é outro fator importante na evolução da resistência, envolvendo a capacidade do biótipo estabelecer-se e aumentar a frequência dentro da população. Características reprodutivas, capacidade de disseminação e potencial de interferência são fatores importantes para a adaptação ecológica dos biótipos. Porém, no caso da resistência, normalmente, percebe-se que os biótipos resistentes são menos competitivos e se reproduzem com mais dificuldade que os susceptíveis; portanto a pressão de seleção (eliminação dos susceptíveis) é mais importante que a adaptação ecológica na evolução da resistência a herbicidas.

5.3.2. Fatores bioecológicos

Fatores relacionados à espécie e sua interação no ambiente são importantes para a evolução da resistência. Há espécies que, por algum motivo, são mais propensas a evoluir a resistência, como nos gêneros *Lolium*, *Amaranthus*, *Conyza*, *Echinochloa*, *Eleusine*, entre outros. Espécies com ciclo de vida curto e capacidade de desenvolver várias gerações por ano, apresentando grande diversidade genética, produção de grande quantidade de sementes com níveis baixos de dormência e altamente susceptíveis a determinado herbicida são mais propensas a evoluir resistência. Ao contrário, espécies de plantas daninhas com características opostas a esses apresentam baixa tendência em evoluir a resistência.

5.3.3. Fatores agronômicos

As práticas agrícolas são os principais fatores que contribuem para a evolução de populações de plantas daninhas resistentes a herbicidas. Como foi comentado, a pressão de seleção, exercida pela aplicação frequente de um único herbicida ou de herbicidas com o mesmo mecanismo de ação, é o fator primordial para selecionar as plantas resistentes. Portanto, o manejo de herbicidas é indispensável para prevenir a evolução da resistência, sendo necessária a rotação de herbicidas de diferentes mecanismos de ação aplicados na área.

Práticas culturais de rotação de culturas também são essenciais, pois culturas diferentes apresentam ciclos de desenvolvimento distintos, com capacidade de interferência diferente,

além de exigirem, na maioria das vezes, práticas agrícolas distintas (incluindo rotação de herbicidas), alterando, assim, a flora espontânea que ocorre na área. O sistema de cultivo também influencia na evolução da resistência, pois afeta diretamente a predominância de espécies na área. Por exemplo, a presença de palha sobre o solo inibe o desenvolvimento de algumas populações de plantas com sementes muito pequenas, como o caruru (*Amaranthus* spp.), ao passo que outras espécies que conseguem emergir através da palha passam a ser dominantes, como a corda-de-viola (*Ipomoea* spp). Portanto, isso também ocasiona uma mudança na flora espontânea.

As práticas culturais e os sistemas de cultivo afetam, portanto, a dinâmica de interações entre plantas daninhas e culturas agrícolas, sendo que outras práticas agrícolas, como a aplicação de herbicidas, alteram a dinâmica entre populações de plantas de diferentes espécies e entre biótipos distintos dentro da mesma espécie, influenciando, portanto, na evolução da resistência de plantas daninhas a herbicidas.

Conhecendo os fatores agronômicos que afetam a evolução da resistência e, também, sua intensidade é possível avaliar o risco de evolução da resistência. De maneira geral, o uso específico de controle químico como único método de controle de plantas daninhas, assim como o uso frequente de um único mecanismo de ação herbicida por longo tempo, associado à falta de rotação de culturas e ao alto nível de infestação na área, acarreta em alto nível de risco para evolução da resistência.

5.4. MECANISMOS

As plantas daninhas podem apresentar resistência a herbicidas em decorrência de um ou mais mecanismos. Os mecanismos de resistência de plantas daninhas a herbicidas decorrem de:

- a) *Alteração do sítio de ação do herbicida* – há perda de afinidade do herbicida pelo seu sítio de ação na planta decorrente de mutações. Dessa maneira, o herbicida não consegue mais se ligar ao sítio de ação, sendo que a planta mantém seu metabolismo normalmente. São exemplos, a resistência de picão-preto (*Bidens pilosa*) e leiteiro (*Euphorbia heterophylla*) a inibidores da ALS e papuã (*Urochloa plantaginea*) a Inibidores de ACCase;

- b) *Sobre-expressão de enzimas* – envolve a produção de enzimas em grandes quantidades pela planta. Nesse caso, há inibição das enzimas, mas não há inibição do metabolismo da planta, no sítio de ação do herbicida, em função da grande quantidade de enzimas produzidas pela planta. Um exemplo é a resistência de caruru (*Amaranthus palmeri*) a Inibidores de EPSPs;
- c) *Metabolização do herbicida* – refere-se à degradação dos herbicidas pelas plantas através de enzimas específicas (principalmente cytP450m, GST e SOD). São exemplos, a resistência de azevém (*Lolium rigidum*) a Inibidores de ALS e Inibidores de ACCase;
- d) *Compartimentalização do herbicida* – envolve a redução da concentração do herbicida que atinge o sítio de ação através da ligação do herbicida na cutícula ou na parede celular e/ou o armazenamento em locais inativos, como o vacúolo (sequestração no vacúolo). São exemplos, a resistência de buva (*Conyza bonariensis*) a Inibidores de EPSPs e Inibidores do FSI.

5.5. DIAGNÓSTICO

O primeiro indício de evolução da resistência de plantas daninhas a herbicidas decorre da permanência de plantas vivas após a aplicação do produto. Nesse caso, deve-se saber se a falha de controle é decorrente do mau uso da tecnologia de aplicação ou se pode ser devido à seleção de biótipos resistentes. Portanto, deve ser avaliado se: a dose aplicada estava correta, o equipamento de pulverização estava calibrado e apto ao uso e se não houve erros no momento da aplicação (barra muito alta ou baixa, faixas sem pulverização etc.). Além disso, deve ser observado se a falta de controle está associada a uma espécie apenas e se as plantas que permanecem vivas são consequência de reinfestações (novos fluxos de emergência). Caso a tecnologia de aplicação estiver adequada, a falta de controle ocorrer para apenas uma espécie e as plantas vivas não forem consequência de reinfestações, pode ser que se trate de plantas daninhas resistentes. Analisemos, então, o histórico de aplicações e controle.

Deve-se perguntar ao produtor quais herbicidas ele está usando para verificar se há histórico de aplicação do mesmo herbicida

frequentemente. Além disso, deve-se perguntar se ele nota que está havendo perda gradativa de eficiência de controle para a planta daninha específica, nos últimos anos. Em caso afirmativo para essas duas observações, é importante que se recorra à literatura para saber se já há casos de resistência a esse determinado herbicida. Se existirem casos, então, provavelmente é um caso de resistência.

Para confirmação da resistência, deve fazer testes experimentais denominados testes de dose-resposta. Nesses testes, plantas do biótipo com suspeita de resistência e de outro biótipo susceptível deverão ser submetidas à pulverização com doses crescentes do herbicida, variando doses múltiplas, para mais e para menos, em relação àquela recomendada no campo. Dependendo do tempo necessário para o mecanismo de ação do herbicida ser desenvolvido, fazem-se avaliações visuais de controle e, também, avaliações de acúmulo de biomassa para ambos os biótipos. Depois disso, deve-se relacionar a DL_{50} (dose letal para 50% dos indivíduos) do biótipo com suspeita de resistência com aquela do biótipo susceptível, calculando o fator de resistência (FR). Fatores de resistência maiores que 1 indicam que o biótipo com suspeita de resistência suporta exposição a doses mais altas do herbicida, de modo que, quanto maior o valor de FR, mais resistente é a população da planta daninha a esse determinado herbicida.

5.6. PREVENÇÃO E MANEJO

Várias práticas agrícolas podem ajudar na prevenção da evolução da resistência e no manejo de plantas daninhas resistentes, sendo indicadas:

- rotação de mecanismos de ação;
- aplicações sequenciais;
- associações de herbicidas com diferentes mecanismos de ação e detoxificação (embora sejam indiretamente proibidas);
- uso de herbicidas de baixo residual e amplo espectro, reduzindo a pressão de seleção;
- rotação de culturas e sistemas de cultivo;
- realização de monitoramento e manejo integrado de plantas daninhas.