



RISCO E SEGURANÇA AMBIENTAL

Efeitos potenciais da introdução de plantas transgênicas

Vagner Augusto Benedito

Dr, Engenheiro Agrônomo, M.Sc., PhD e Pós-doutorando do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) Universidade de São Paulo (USP).
benedito@cena.usp.br

Antonio Vargas de Oliveira Figueira

Dr, Engenheiro Agrônomo, PhD, Livre Docente e Professor Associado do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), Universidade de São Paulo (USP).
figueira@cena.usp.br

Introdução

A falta de conhecimento pelos consumidores das práticas agrícolas tende a enfatizar as preocupações sobre o impacto ambiental do cultivo de plantas geneticamente modificadas. Um aspecto importante quando se avalia o impacto das plantas transgênicas é a definição de uma base comparativa, uma vez que todos os tipos de agricultura, mesmo o cultivo orgânico, causam grandes impactos ao meio ambiente. A origem do desequilíbrio ambiental causado pela agricultura reside na necessidade primordial de fornecer alimentos e matéria-prima para a manutenção e desenvolvimento das sociedades humanas, muito mais numerosas hoje do que num equilíbrio pré-civilização.

O impacto dos transgênicos sobre o ambiente vem sendo muito discutido, chegando a envolver seriamente as esferas científicas, políticas e da sociedade leiga. A tecnologia transgênica tem o potencial de revolucionar a agricultura, prometendo desde maiores produtividades (pela resistência a estresses bióticos e abióticos, ou melhor eficiência fotossintética) até menor aplicação de pesticidas e fertilizantes, além de possibilitar a produção de fármacos e alimentos com melhores propriedades nutricionais. Contudo, os transgênicos têm sido alvo de discussão em relação aos possíveis riscos de desequilíbrio do ecossistema oriundos da introdução de variedades transgênicas no campo.

A natureza dos riscos ambientais de transgênicos depende das caracte-

terísticas particulares da biologia de cada espécie, do transgene, do ecossistema no qual a lavoura será implantada, além do manejo do sistema de produção e de uma regulação governamental e sua aplicação. Entretanto, não se deve perder a perspectiva do impacto ambiental causado pela própria agricultura convencional.

Para a maioria dos riscos potenciais das plantas transgênicas, estratégias têm sido desenvolvidas e adotadas para minimizá-los. A adoção de transgênicos no Brasil precisa, assim, ser considerada caso a caso e os dados experimentais acerca do impacto no ambiente necessitam ser validados em condições tropicais e subtropicais.

Neste artigo, uma análise do debate sobre os transgênicos e de seus potenciais riscos ambientais inicia-se à luz do legado de Rachel Carson, do princípio da precaução e da revolução verde, culminando nos problemas ambientais levantados a respeito das plantas transgênicas e da perspectiva de superação desses problemas.

O legado de Carson

O momento após a II Guerra Mundial trouxe um desenvolvimento nunca antes presenciado pela humanidade e a maioria dos membros da sociedade acreditava que a ciência levava a criação de coisas essencialmente boas. Essa era a visão da sociedade acerca de todo o progresso tecnológico pós-guerra, incluindo o que passou a se chamar de revolução verde, um pacote de novas tecnologias de produção agrí-

cola, como tratores, cultivares melhorados (milho híbrido, trigo-anão), o uso massivo de fertilizantes e defensivos (incluindo-se o inseticida DDT, usado contra o vetor da malária e na agricultura).

Rachel Carson (1907-1964) observou e relatou em seu livro “Primavera Silenciosa” (1962), o impacto imprevisto na natureza e na sociedade humana causado pelo uso desenfreado do DDT, como o desequilíbrio em insetos não-alvo, o acúmulo do inseticida nas cadeias tróficas e no homem e os seus potenciais efeitos carcinogênicos nas futuras gerações. O livro causou grande impacto, levando à proibição de seu uso em diversos países a partir da década de 1970. Entretanto, esse livro foi mais longe, ajudando a firmar a consciência de uma relação entre as atividades humanas e o equilíbrio da natureza, além de deixar a sociedade alerta quanto aos riscos potenciais das novas tecnologias e conquistas científicas. Rachel Carson é lembrada por ter alertado a humanidade que o progresso científico deve estar sempre aliado à conservação ambiental. É nesse contexto que se faz premente e salutar o debate em todo o mundo sobre a segurança e riscos potenciais envolvidos na produção das plantas transgênicas.

Risco e Segurança Ambiental e o método científico

O risco ambiental de uma tecnologia envolve a probabilidade inerente dessa tecnologia trazer dano ao ambiente. Por outro lado, segurança ambiental é a certeza dessa tecnologia ser inofensiva ao bioma. Infelizmente, dada à complexidade envolvida nas relações ecológicas naturais, é muito difícil de serem estabelecidos com precisão todos os riscos potenciais ou de se dar um índice absoluto de segurança ambiental para uma tecnologia ainda a ser implementada.

Da mesma forma, o rigor científico também não permite oferecer conclusões absolutas fora do âmbito da experimentação e análise, ou seja, não é possível concluir a segurança

ambiental de uma tecnologia sem antes testá-la nas mesmas condições de sua utilização, nem de certifi-cá-la por um tempo maior do que aquele avaliado experimentalmente.

Entretanto, há avaliações científicas que poderão oferecer níveis de segurança ambiental, embora perguntas inovadoras poderão ficar sem resposta até que uma experimentação adequada seja concluída.

Os riscos ambientais causados pela inovação biotecnológica são basicamente o desequilíbrio dos ecossistemas biológicos pela introdução de novos agentes catalisadores de mudanças nas relações ecológicas; a perda da biodiversidade natural de um ecossistema pelos danos causados pelo potencial de seleção de uma ou mais espécies (adaptabilidade); e o fluxo gênico entre espécies relacionadas ou não (transferência gênica vertical ou horizontal). É importante ressaltar que riscos ambientais semelhantes derivam da atividade agrícola tradicional.

Com relação aos riscos inerentes à biotecnologia, incluindo a transgenia, diversos documentos oficiais de governos e organizações trabalharam no tema ambiente e impacto causado pelo homem, estabelecendo-se o “princípio da precaução”.

Princípio da Precaução

O princípio da precaução é a formulação em redação jurídica do ditado popular “*antes prevenir do que remediar*” e descreve a “procura pela imposição de medidas preventivas antecipadas para prevenção daqueles riscos para os quais se tem pouco ou nenhum conhecimento no qual se possa predizer a probabilidade de dano futuro” (Conko, 2003). É a aplicação da máxima latina “*in dubio pro reo*”, que se torna “*in dubio pro natura*”.

Tendo surgido na década de 1980, o princípio da precaução foi reformulado tantas vezes em documentos oficiais, que Sandin (1999) encontrou 19 formulações diferentes. Assim, pode-se dizer hoje que existem vários princípios da precaução, seguindo duas correntes: uma

forte e outra mais branda (Morris, 2000).

A corrente forte do princípio da precaução dita que a incerteza sobre a exposição ou magnitude de um risco justifica necessariamente uma resposta regulatória para prevenir ou minimizar o risco. Essa aceção do princípio da precaução exige uma garantia de segurança absoluta, o que é impossível de ser oferecida pelo rigor do método científico.

Já a versão mais branda do princípio, mais amplamente adotada, pondera que a incerteza não deve ser usada como uma desculpa para a inação governamental nem como justificação para prevenir uma resposta regulatória. O exemplo clássico dessa definição é dada pela Declaração Ministerial da II Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, ocorrida no Rio de Janeiro em 1992 (ECO-92). O documento, conhecido como Declaração do Rio, afirma no Princípio 15 da Carta da Terra: “onde existam ameaças de riscos sérios ou irreversíveis, não será utilizada a falta de certeza científica total como razão para o adiamento de medidas eficazes em termos de custos para evitar a degradação ambiental” (ONU, 1992).

Mais recentemente, a Convenção sobre Diversidade Biológica, em 2000, levou à formulação do Protocolo de Biossegurança de Cartagena, que busca a proteção da biodiversidade ecológica dos riscos potenciais impostos por organismos transgênicos, referindo-se ao princípio da precaução e reafirmando o Princípio 15 da Declaração do Rio. Ademais, o protocolo também estabeleceu medidas de compensação para a biossegurança (*Biosafety Clearing-House*) no intuito de facilitar o intercâmbio de informações científicas, técnicas, ambientais e legais e as experiências com os organismos geneticamente modificados. O Brasil ratificou o protocolo em novembro de 2003, o qual entrou em vigor em fevereiro de 2004.

Inerente à precaução que o princípio postula, há dialeticamente o risco de paralisação (Sustein, 2002), uma vez que novas tecnologias, pela

própria definição de inovação, trazem incertezas e riscos. Não se podendo calcular riscos imprevisíveis, o que deve ser analisado na decisão sobre uma tecnologia ou produto são os parâmetros que levem a julgar sobre os possíveis custos ambientais em relação aos prováveis benefícios sociais trazidos por sua implementação ou banimento.

Revolução Verde e Biotecnologia

A revolução verde, trazendo novas perspectivas de produção e produtividade agrícola, foi um elemento-chave na conquista da segurança alimentar atual. A fome mundial já não se deve mais à falta de alimento, mas à má distribuição de riquezas entre países e classes sociais (FAO, 2001). A revolução na produção agrícola ocorreu no período pós-guerra, mas toda a tecnologia produtiva estava limitada ao potencial genético-produtivo inerente às culturas.

Hoje, com o advento da biotecnologia, se fala numa segunda revolução verde, que não mais estaria limitada ao potencial genético natural das espécies, mas que permite o intercâmbio gênico de uma espécie a uma outra não relacionada, superando até mesmo barreiras entre os domínios da vida, como a introdução de genes de uma bactéria ou animal em uma planta ou vice-versa. A biotecnologia tem, assim, a potencialidade de aumentar enormemente a produtividade agrícola, bem como gerar produtos até então inexistentes e facilitar a obtenção ou melhorar a qualidade dos produtos primários.

É certo que o sistema produtivo proveniente da revolução verde trouxera consigo um imenso impacto ambiental, no uso em grande escala de máquinas e agroquímicos, alterando drasticamente as relações ecológicas naturais, embora a agricultura seja essencialmente impactante ao ambiente, até mesmo a agricultura ecológica, ao estabelecer novas relações tróficas e introduzir novas espécies no ecossistema ou modificar as proporções das espécies nativas.

O que se busca atualmente é uma agricultura que apresente o menor impacto ambiental possível, que necessite de um menor consumo energético no sistema produtivo e com a maior produtividade possível, para minimizar a expansão das terras agrícolas e atender ao aumento populacional.

Embora o problema nos dias atuais não seja o volume da produção agrícola, mas sua distribuição, a população mundial vem crescendo em índices elevados e a ciência não pode deixar para pensar a questão alimentícia quando o fato já estiver instalado. Ao invés, é um dever dos cientistas buscar respostas antecipadamente à instalação dos problemas e, assim, garantir o curso da humanidade. É nesse fato que as plantas transgênicas de alto desempenho produtivo podem exercer um papel preponderante.

Riscos potenciais associados aos cultivos transgênicos

Os riscos ambientais potenciais da introdução das plantas transgênicas incluem: a) o *fluxo gênico* para espécies selvagens, que dependendo da vantagem seletiva oferecida pelo transgene poderia levar ao aumento da população de ervas daninhas; b) os efeitos colaterais indesejáveis em *organismos não-alvo*, sejam os microorganismos ou os insetos inimigos naturais presentes nas culturas, afetando a biodiversidade de um ecossistema; c) ou mesmo o aumento das chances de extinção de populações de espécies vegetais selvagens causada pela *depressão genética* devido à introdução de novos genes no ecossistema. Todos esses riscos ambientais não são exclusivos das culturas transgênicas, sendo também inerentes aos sistemas convencionais de agricultura, seja pelo emprego de novas culturas ou cultivares geneticamente melhoradas ou pelo controle agroquímico de pragas, doenças e ervas daninhas.

Entretanto, o que se conjectura mais fortemente em relação aos transgênicos é a utilização de genes

oriundos de outros domínios da vida, especialmente os genes bacterianos e virais, cujas plantas transgênicas poderiam servir de ponte genética para o surgimento de variedades ou cepas incontrolláveis pelo homem. Cada um dos pontos levantados sobre os riscos ambientais dos transgênicos é examinado abaixo.

Fluxo Gênico não intencional.

Entende-se por fluxo gênico não intencional (escape gênico) a capacidade de um gene chegar indesejavelmente e ser inserido em populações onde este gene não exista. Em relação aos transgênicos, temem-se três casos, em ordem crescente da probabilidade: a) de uma planta transgênica para organismos não relacionados, como microorganismos ou plantas de outras famílias botânicas; b) de uma planta transgênica para uma outra espécie da mesma família; c) de uma planta transgênica para a mesma espécie não transgênica.

Em relação às possibilidades do fluxo gênico dos transgênicos a outros organismos, a transferência natural de um transgene para organismos não relacionados não foi relatada até o momento, podendo ser considerada, portanto, de baixo risco. Do mesmo modo, a transferência gênica entre espécies vegetais não relacionadas é dificultada por barreiras biológicas naturais, incluindo incompatibilidades de polinização e fecundação.

A transferência de genes de uma espécie transgênica a uma espécie botanicamente relacionada é mais plausível e deve ser analisada cautelosamente. Espécies ou famílias de culturas silvestres apresentam maior potencial de fluxo gênico pela maior probabilidade de existirem outras espécies geneticamente compatíveis por cruzamento, algumas podendo ser espécies invasoras de culturas, criando-se o risco de se produzir super-ervas daninhas, dependendo do transgene. No Brasil, muitas espécies cultivadas são nativas do país ou da América do Sul e possuem espécies selvagens no país, como

POTENCIALIDADES DAS PLANTAS TRANSGÊNICAS

A possibilidade da inserção de genes de interesse produtivo ou qualitativo que antes não estavam disponíveis em uma dada espécie aumentou enormemente as perspectivas do melhoramento genético. Um dos genes mais comentados nos meios de comunicação é o que confere resistência ao glifosato, um herbicida não seletivo. A introdução desse gene em culturas como a soja facilita a tarefa de controlar as plantas daninhas no campo, ao necessitar apenas um herbicida para conter o crescimento do mato na cultura, podendo até mesmo diminuir o consumo de agroquímicos no ciclo da cultura.

Também se fala muito na mídia sobre o gene *Bt*, que confere resistência a insetos mastigadores em culturas como milho, algodão, batata, tabaco e tomate. Esse gene codifica endotoxinas *cry* (*crystal*) originárias da bactéria do solo *Bacillus thuringiensis*. O cultivo de plantas *Bt* traz menor custo de produção, ao diminuir a pulverização de inseticidas contras as pragas. No caso do algodão, cujo cultivo está limitado no Brasil por causa do bicudo, o uso de cultivares *Bt* poderia trazer aumento a produtividade e reduzir o consumo de inseticidas. Alternativamente ao gene bacteriano *Bt*, já existem alternativas de genes derivados do reino vegetal na conferência de resistência a insetos, como o gene *OC1* (*orizacistatina1*), derivado do arroz.

Além das pragas, muitas culturas têm sua produção dificultada ou inviabilizada por doenças produzidas por infecções virais. No Brasil, podem-se citar exemplos como o mosaico dourado do feijoeiro, a mancha anelar do mamoeiro, o mosaico da batateira e o enrolamento da batateira. A expressão de fragmentos do gene da capa protetora do vírus em uma planta pode conferir resistência ao ataque viral, possibilitando o plantio ou o aumento da produção em áreas infestadas. Também se explora o potencial dos transgenes na conferência de resistência a estresses abióticos, como seca, salinidade e temperaturas extremas.

Apesar de muito se falar no ganho produtivo conferido pelos transgênicos, há vários estudos que objetivam o aumento da qualidade dos produtos agrícolas, como uma maior vida de prateleira dos produtos hortícolas e ornamentais e uma melhor qualidade nutricional de alimentos como o milho, a soja e o arroz. Esses produtos, ao invés de visarem facilitar o processo produtivo, visam fornecer produtos com maior qualidade ou incluir novas características de interesse direto do consumidor. Um exemplo de alimento transgênico funcional é o arroz dourado (*Golden Rice*[®]), que através da introdução de dois genes que codificam enzimas importantes na rota metabólica do b-caroteno, aumentam a quantidade de vitamina A no grão, o que pode ajudar a suprir a deficiência dessa vitamina em crianças de regiões pobres do globo. Na mesma linha, têm-se conduzido pesquisas para aumentar as quantidades de ferro e outros micronutrientes e vitaminas em outras culturas alimentares (Potykrus, 2001; Welch e Graham, 2004).

Algumas plantas transgênicas também têm como objetivo único o benefício do ambiente. A fitorremediação por plantas transgênicas visa a descontaminação de águas e solos poluídos pela alteração no metabolismo das plantas que permite absorver substâncias poluentes a um nível não alcançado por plantas não transgênicas. Um dos exemplos é na absorção de metais pesados (como arsênio, cádmio, chumbo, cobalto, cobre, cromo, mercúrio, níquel, lítio, selênio, zinco). As plantas podem, então, ser removidas do lugar para possibilitar um trabalho de purificação e reutilização do metal pesado absorvido.

mandioca, cacau, batata, amendoim, tomate, maracujá, goiaba e abacaxi. Em alguns casos, mesmo sendo as espécies cultivadas originárias de outros continentes, podem existir no país espécies relacionadas selvagens com potencial de serem sexualmente compatíveis. Como o caso do arroz, originário da Ásia, mas que possui espécies daninhas sexualmente compatíveis no Brasil (“arroz vermelho”). A capacidade de cruzamentos interespecíficos deve ser investigada caso a caso e nota-se uma falta de informação acerca das possibilidades dos cruzamentos existentes entre as espécies e as culturas brasileiras.

Já o caso mais plausível de fluxo gênico é a contaminação de uma lavoura não transgênica pelo pólen oriundo de culturas transgênicas da mesma espécie. Aqui é importante

lembrar a classificação das culturas vegetais em dois tipos distintos de polinização: as de fecundação cruzada (alógamas, cuja biologia favorece a dispersão do pólen no intuito de fecundar outras plantas, com taxa normalmente superior a 90% de fecundação cruzada), e as de autofecundação (autógamas, cuja biologia floral favorece a autopolinização, com um máximo de 5% de fecundação cruzada). Quanto maior a dispersão do pólen e a taxa de fecundação cruzada, maior a probabilidade de o fluxo gênico atingir locais mais distantes.

Também se deve levar em conta os vetores da polinização. Muitas espécies utilizam vetores abióticos para a dispersão, especialmente o vento e a água. Outras espécies utilizam vetores biológicos, como insetos (abelhas, mamangavas), pás-

saros (beija-flores) e mamíferos (morcegos). Uma análise do fluxo gênico no impacto ambiental deve levar em consideração a eficiência e alcance da dispersão do pólen.

O milho, originário do México, é espécie alógama e usa especialmente o vento para a dispersão de pólen. Um trabalho conduzido por Eastham e Sweet (2002) indica que a distância máxima alcançada pelo pólen do milho *Bt* foi de 100 m, enquanto uma média de 98% do pólen se restringiu aos primeiros 50 m da lavoura. Vale ressaltar que as distâncias de alcance do pólen podem variar de região para região, dependendo da variedade do milho, da força do vento no local e período de florescimento da cultura, da geografia do terreno, dos tratamentos culturais etc.

A soja, por outro lado, é espécie autógama originária do continente

asiático. Estudos conduzidos com variedades não transgênicas de soja, ao analisar a polinização natural em campo aberto no delta do Mississipi, mostraram uma taxa de polinização cruzada de 0,41% a 0,9 m e 0,03% a 5,4 m da fonte de pólen (Ray et al., 2003). Já um trabalho envolvendo dispersão de pólen transgênico da cultivar BR-16 no cerrado brasileiro relata uma taxa de 0,45% de polinização cruzada a 0,5 m, chegando a 0,14% a 1,0 m e atingindo assintoticamente a nulidade a 6,5 m da cultura transgênica (Abud et al., 2003).

Portanto, o alcance do pólen das plantas transgênicas, a possibilidade de ocorrência de fluxo gênico entre suas espécies relacionadas e o impacto que o transgene possa ter em espécies selvagens compatíveis devem ser avaliados criteriosamente. É importante ressaltar, entretanto, que o fluxo transgênico só será bem sucedido se conferir vantagem adaptativa nas condições naturais do ambiente.

Impacto das culturas transgênicas nas relações tróficas do ecossistema

Outro ponto de debate sobre os transgênicos refere-se ao seu impacto no ecossistema quanto às mudanças das relações alimentares entre os insetos, as plantas e outros organismos. O caso mais lembrado do efeito das culturas transgênicas sobre o meio ambiente é a morte das larvas de borboletas monarcas provocada pela alimentação com pólen de milho *Bt* (Losey et al., 1999). Houve ampla discussão na comunidade científica e chegou-se à conclusão que os ensaios conduzidos em laboratório não refletiriam as reais condições que as larvas enfrentariam no campo, (cuja dieta não seria exclusivamente de pólen de milho, como feito no experimento), embora o trabalho tenha contribuído para levantar o debate sobre os possíveis efeitos das plantas transgênicas sobre as relações tróficas do ecossistema.

Junto às pragas de uma lavoura co-habitam inúmeras espécies de

insetos, incluindo espécies benéficas que atuam como controladoras dos níveis das pragas (espécies de parasitóides e predadores de insetos, como vespas e joaninhas). As plantas transgênicas que possuem resistência a insetos abaixam os níveis das pragas tão drasticamente, que as relações ecológicas do sistema se modificam e podem também levar à perda da fauna benéfica da lavoura.

É inútil, porém, qualquer discussão sobre o impacto das culturas transgênicas sobre as populações de insetos (benéficos ou pragas) sem relacioná-los com os impactos das culturas não transgênicas e os tratamentos culturais tradicionais, como a pulverização das culturas com inseticidas de amplo espectro, que também terão vários níveis de impacto sobre a população de insetos benéficos. Também se deve ter em mente que análises ecológicas preliminares conduzidas em laboratório podem não refletir as condições encontradas no campo e que, dependendo da metodologia adotada, podem levar a, quando muito, indicações das possibilidades a serem alcançadas no campo. Também se levanta a discussão sobre a presença da proteína inseticida nos tecidos dos transgênicos durante todo o ciclo da cultura, em comparação à presença ocasional de inseticidas nos cultivos tradicionais, que são degradados após um período de carência de dias ou semanas.

Head et al. (2001) estudou a presença da proteína *Cry1Ab* nos tecidos de pragas alimentadas com milho transgênico, para analisar o potencial de risco de exposição à proteína pelos inimigos naturais dessas pragas. O trabalho concluiu que os níveis da proteína transgênica encontrados nos tecidos das pragas eram extremamente baixos para serem danosos ao metabolismo dos inimigos naturais. Dessa forma, pelo menos diretamente, a proteína *Cry1Ab* parece segura ao nível trófico superior aos das pragas das culturas.

O impacto da canola transgênica com o gene da *orizacistatina1 (OC1)* sobre a população de joaninhas (*Harmonia axyridis*) foi avaliado por

Ferry et al. (2003), concluindo que o consumo de pragas que se alimentam de cultura transgênica não teve impacto no desenvolvimento nem na sobrevivência da espécie predadora de insetos. Essa conclusão é reforçada pelos estudos de Bouchard et al. (2003), que encontraram uma compensação digestiva no metabolismo dos predadores naturais de insetos que consumiam pragas da batata transgênica com a proteína *OC1*.

Schuler et al. (1999) confirmaram que a presença da toxina *Bt* em larvas da traça da canola não teve efeito significativo na população de vespas parasitóides, mas que os parasitóides não emergiam das larvas de traças alimentadas por plantas transgênicas porque as traças morriam antes que as vespas pudessem se desenvolver ou emergir delas. Concluíram, assim, que as plantas *Bt* podem até apresentar vantagens ecológicas sobre a aplicação de inseticidas de amplo espectro.

Também não se deve esquecer que os altos índices de insetos-praga na lavoura já é um manifesto da modificação descontrolada do ecossistema introduzida pela agricultura convencional, ao utilizar inseticidas que não distinguem entre pragas e insetos benéficos e ao introduzir novas espécies ou aumentar seu número no ecossistema.

Os cientistas também consideram grande o potencial de os insetos desenvolverem resistência à proteína *Bt* no médio e longo prazo (Rahman et al., 2004; Tabashnik et al., 2003). Liu et al. (1999) fizeram estudos em laboratório e desenvolveram modelos matemáticos para a seleção a favor da resistência à proteína *Bt* pela traça do algodoeiro (*Pectinophora gossypiella*), concluindo que a possível seleção natural de indivíduos resistentes à toxina *Bt* poderia levar à formação de toda uma população de pragas resistentes. O trabalho publicado por Zhao et al. (2000) também relata a rápida adaptação de traças à proteína *Cry1C* em brócolis transgênico.

Uma estratégia levantada para controlar ou adiar a emergência da resistência dos insetos a toxinas

transgênicas é a utilização concomitante de dois transgenes bacterianos de indução de resistência a insetos (piramidação; Zhao et al., 2003). Outra estratégia para postergar o surgimento de insetos resistentes às toxinas transgênicas em um ecossistema é o plantio de plantas sem expressão da toxina perto da lavoura com transgênicos, objetivando a criação de refúgio para os elementos faunísticos locais, incluindo pragas não resistentes ao *Bt*, que seriam fonte genética de susceptibilidade à toxina para gerações futuras de insetos. Modelos matemáticos indicam que a resistência dos insetos pode ser adiada consideravelmente com a adoção da estratégia de refúgios (Gould, 1998). Entretanto, Chilcutt e Tabashnik (2004) ponderam que a contaminação dos refúgios pelo fluxo gênico possa limitar a eficiência dessa estratégia nas pragas das espigas de milho.

Toxicidade das proteínas transgênicas à biota do solo

O solo é um ambiente complexo composto por elementos minerais (areia, argila e silte), materiais orgânicos em decomposição e uma comunidade biológica que envolve microorganismos, raízes e animais inferiores, incluindo muitos exemplos de relações simbióticas. Teme-se que culturas transgênicas introduzidas no ambiente lancem no solo, através dos exsudatos de suas raízes, compostos nocivos aos microorganismos e que modifiquem suas relações ecológicas.

Mendensohn et al. (2003) estudou a bioatividade das proteínas *Bt* no solo e nos tecidos das plantas e concluiu que a proteína *cry1Ab* tinha meia-vida (DT_{50}) média de 1,6 dia com o tecido vegetal no solo; de 25,6 dias com o tecido vegetal não exposto ao solo e 8,3 dias com a proteína purificada colocada diretamente no solo. Uma degradação de 90% (DT_{90}) foi atingida, respectivamente, com 15; 40,7 e 32,5 dias. Note-se, porém, que as conclusões do estudo estão contidas nas condições edafoclimáticas utilizadas no experimento e não devem ser

extrapoladas para outras condições sem experimentação *in loco*. Nesse mesmo trabalho, também foi analisada em organismos não-alvo a toxicidade das proteínas *cry* derivadas de pólen, farinha de milho ou proteína purificada e adicionada ao solo. Não foram encontrados, porém, efeitos adversos nos organismos estudados e nas dosagens estudadas.

Transgênicos e plantas daninhas

A utilização de plantas transgênicas com genes que conferem resistência a herbicidas de amplo espectro tende a facilitar os tratos culturais e a manter a cultura sem competidores (“no limpo”), mas, além do perigo do fluxo gênico discutido anteriormente, também pode ocorrer a seleção natural de plantas que sejam resistentes aos herbicidas e, assim, induzir a invasão de plantas daninhas à cultura cuja pulverização com o herbicida seja inócua tanto à cultura transgênica, quanto à planta daninha, criando-se “super-plantas daninhas”. O caso mais conhecido de cultura resistente a um herbicida é o da soja resistente ao glifosato (Roundup®, Monsanto), herbicida de amplo espectro, o qual poucas espécies vegetais têm mecanismo de resistência ou tolerância.

Um gene de resistência de herbicida alternativo derivado de plantas é o *abas*, da *Arabidopsis thaliana*. Esse gene codifica a enzima *ácido acetohidroxi sintase*, cuja presença confere resistência ao herbicida de amplo espectro imazapyr (Arsenal®, BASF), de longo efeito residual (seis meses a dois anos no solo), mas com pouco efeito na microbiota do solo e baixa toxicidade nos organismos animais (classificação toxicológica IV, ou seja, um produto que normalmente não oferece perigo). O Brasil, através da Embrapa, já gerou uma variedade de soja transgênica com o gene *abas*, chamada BR-16.

Também são causa de preocupação as sementes de culturas resistentes a herbicidas que ficam no solo após a colheita, caso a próxima cul-

tura a ser instalada utilizar o mesmo herbicida para o controle das plantas daninhas. As plantas emergentes das sementes da cultura passada atuarão, então, como plantas daninhas da nova cultura e causando menor produtividade da nova cultura dada à competição instalada entre as duas espécies na lavoura.

Surgimento de novas cepas de vírus

Constituídos basicamente de uma capa protéica e RNA (ou DNA, em alguns casos), os vírus são parasitas obrigatórios que necessitam usar a maquinaria metabólica de células hospedeiras para se multiplicarem. Os organismos eucarióticos (fungos, protozoários, vegetais e animais) têm mecanismos de defesa contra infecções virais, mas os próprios vírus têm uma enorme plasticidade genética que lhes permite adquirir rapidamente novas características e driblar os mecanismos de defesa de suas células hospedeiras.

O melhoramento genético clássico tem colaborado na criação de cultivares resistentes a diversas doenças virais, mas há muitos casos em que fontes naturais de resistência não estão disponíveis. Uma das formas de indução de resistência viral é a imunização de células vegetais pela inserção e expressão de um fragmento do gene que codifica a proteína da capa do vírus no genoma da planta. Entretanto, teme-se que novas cepas virais possam ser originadas a partir de eventos naturais de recombinação genética, como transcapsidação, encapsidação heteróloga ou complementação (Tepfer, 2003), cepas essas que poderão trazer diferentes características, como a capacidade de infectar novas espécies, de utilizar novos vetores, possuir novos mecanismos de infecção ou maior virulência.

O primeiro exemplo de planta transgênica resistente a vírus foi um tabaco com um transgene do vírus do mosaico (TMV), enquanto hoje existem dezenas de plantas transgênicas, como batata, ervilha, feijão, mamão, melão, pepino, tomate, trigo, uva, cujo objetivo é in-

duzir resistência viral. Entretanto, já foram identificados eventos de recombinação entre o genoma de planta transgênica e o genoma de vírus em condições de laboratório (Borja et al., 1999) e de campo (Vigne et al., 2004), levantando questões acerca da geração de possíveis cepas virais com propriedades diferentes das originalmente geradas.

Outra estratégia seria o uso de RNAs satélites (parasitas moleculares naturais de alguns vírus). Essa metodologia foi verificada contra o vírus do mosaico do pepino e, apesar de o nível de proteção ao ataque viral ter sido considerado efetivo, o risco de mutação numa forma necrogênica (infeciosa) foi considerado excessivo para uso extensivo e essa abordagem foi abandonada. Um caso a ser lembrado é a epidemia que ocorreu no final da década de 1980 em campos de tomateiros da Itália e da Espanha, causada por RNAs satélites necrogênicos não transgênicos. Estudos chegaram à conclusão que mutações num único nucleotídeo do genoma do RNA satélite de uma cepa não necrogênica poderia ser suficiente para transformar-la em necrogênica (Tepfer, 2003).

Estudos também apontam que outra opção à indução de resistência baseada nos mecanismos de defesa das plantas são estratégias moleculares de indução de resistência nos mecanismos de ataque e proliferação dos vírus, como a resistência mediada pela replicase ou pela proteína de movimento do vírus (Wilson, 1993). Há cientistas que, assim como na resistência contra insetos, apostam na piramidação transgênica de indução de resistência viral como uma estratégia eficiente na produção de plantas com resistência duradoura (Prins, 2003), enquanto outra corrente aposta no desenvolvimento de proteínas antivirais (Uhrig, 2003).

É possível, entretanto, que estudos detalhados dos mecanismos moleculares da infecção viral e nos modos de ação dos genes a serem utilizados originem em alguns casos estratégias transgênicas potencialmente seguras quanto aos possíveis

efeitos de encapsidação heteróloga e a transmissão de vírus por seus vetores, enquanto em outros casos ainda não foram desenvolvidos meios de eliminação dos riscos potenciais associados à resistência viral transgênica (Tepfer, 2002).

Avaliação dos riscos ambientais

A avaliação dos riscos ambientais dos cultivos transgênicos é fundamental para identificar os riscos potenciais dessa tecnologia, dar segurança à população e auxiliar os cientistas a eliminar esses riscos. Em qualquer estudo de análise de risco ambiental, deve-se levar a cabo um estudo comparativo com manejos agrícolas tradicionais, para evitar um julgamento tendencioso.

Também se deve ter em mente que estudos conduzidos em laboratório na maioria das vezes não condizem com as condições encontradas no campo. Dessa forma, os resultados obtidos nesses experimentos poderão apenas indicar situações ou tendências, mas não poderão afirmar que a dinâmica ecológica natural se comportará como nos ensaios.

Um procedimento posterior aos ensaios laboratoriais pode ser a avaliação em campos de produção, onde plantios transgênicos são conduzidos em situações reais de produção e comparados com os cultivos convencionais. Essa é possivelmente a metodologia mais adequada para se tomar conclusões científicas sobre os transgênicos. Recentes avaliações em campos de produção de transgênicos tolerantes a herbicidas foram realizadas na Grã-Bretanha com respeito ao manejo e contexto agrônômico (Champion et al., 2003); os efeitos na abundância e diversidade de ervas daninhas (Heard et al., 2003a); os efeitos sobre espécies individuais (Heard et al., 2003b); as respostas da fauna artrópode (Haughton et al., 2003); das relações tróficas entre invertebrados e plantas (Hawes et al., 2003); e avaliações dos invertebrados e da vegetação em campos marginais aos campos com transgênicos (Roy et al., 2003), além do racional científico e uma

interpretação das avaliações em campos de produção (Squire et al., 2003). Estudos similares em condições tropicais são recomendáveis para se chegar a uma conclusão do impacto dos transgênicos sobre o ambiente e perigos inerentes.

A análise de risco de plantas transgênicas resistentes a vírus foi discutida por Tepfer (2002), examinando riscos potenciais associados a várias estratégias moleculares e concluiu que a análise de risco do uso desses transgênicos também deve levar em conta um estudo comparativo das vantagens e desvantagens das plantas transgênicas e não transgênicas para se chegar a uma decisão ambientalmente sustentável.

Estratégias para diminuir o potencial de risco ambiental das plantas transgênicas

No nível molecular, pode-se optar por estratégias alternativas como: a) uso de promotores de expressão específicos para tecidos ou somente em alguns estádios do desenvolvimento, ao invés do uso de promotores constitutivos; b) sistemas induzíveis quimicamente, cujos promotores são ativados com aplicações de produtos pouco tóxicos, como o álcool (Deveaux et al., 2003); c) uso de transgenes eucarióticos em detrimento de genes e seqüências reguladoras oriundas de bactérias e vírus; d) evitar o uso de genes de resistência a antibióticos durante a seleção de plantas, mas preferir alternativas como genes de resistência a compostos sintéticos (Lohar et al., 2001); e) e tecnologia de recombinação pós-transformação, em que os genes marcadores de seleção co-inseridos no genoma da planta são retirados. É importante notar, entretanto, que nem todas essas técnicas já estão disponíveis para uso comercial, sendo que algumas ainda estão sendo testadas em modelos biológicos, mas poderão estar disponíveis num futuro próximo.

Conclusões

O debate sobre as implicações

ambientais envolvendo as plantas transgênicas é apenas a parte técnico-científica da discussão sobre o assunto, a qual também abrange aspectos econômicos, políticos, sociais e éticos. É importante salientar, porém, que os vários transgênicos já produzidos são distintos em relação à espécie da cultura e suas relações trófico-ecológicas, biologia floral e mecanismos de polinização, probabilidade de fluxo gênico não intencional, além de cada transgene conferir uma característica peculiar, de maior ou menor potencial de impacto no ambiente, de maior ou menor grau de ganho econômico, de maior ou menor interesse social. Deve-se, portanto, ser criada uma política aberta de análise caso a caso, além de se permitir à sociedade o acesso aos dados científicos numa linguagem clara, didática e não preconceituosa acerca dos transgênicos para que a sociedade forme uma opinião e se decida conscientemente sobre o consumo ou não das plantas transgênicas.

Referências

- Abud S, Souza PIM, Moreira CT, Andrade SRM, Ulbrich AV, Vianna GR, Rech EL, Aragão FJL.** 2003. Dispersão de pólen em soja transgênica na região do Cerrado. Pesquisa Agropecuária Brasileira 38:1229-1235
- Borja M, Rubio T, Scholthof HB, Jackson AO.** 1999. Restoration of wild-type virus by double recombination of tombusvirus mutants with a host transgene. Molecular Plant-Microbe Interactions 12:153-162
- Bouchard E, Cloutier C, Michaud D.** 2003. Oryzacystatin I expressed in transgenic potato induces digestive compensation in an insect natural predator via its herbivorous prey feeding on the plant. Molecular Ecology 12:2439-2446
- Champion GT, May MJ, Bennett S, Brooks DR, Clark SJ, Daniels RE, Firbank LG, Haughton AJ, Hawes C, Heard MS, Perry JN, Randle Z, Rossall MJ, Rothery P, Skellern MP, Scott RJ, Squire GR, Thomas MR.** 2003. Crop management and agronomic context of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1801-1818
- Chilcutt CF, Tabashnik BE.** 2004. Contamination of refuges by *Bacillus thuringiensis* toxin genes from transgenic maize. Proceedings of the National Academy of Science of the USA 101:7526-7529
- Conko G.** 2003. Safety, risk and the precautionary principle: rethinking precautionary approaches to the regulation of transgenic plants. Transgenic Research 12:639-647
- Deveaux Y, Peaucelle A, Roberts GR, Coen E, Simon R, Mizukami Y, Traas J, Murray JA, Doonan JH, Laufs P.** 2003. The ethanol switch: a tool for gene-specific induction during plant development. Plant Journal 36:918-930
- Eastham K, Sweet J.** 2002. Genetically modified organisms (GMOs): the significance of gene flow through pollen transfer. European Environment Agency. Copenhagen, Denmark
- FAO.** 2001. Ethical issues in food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma. 32p. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/003/X9601e/X9601e00.pdf>
- Ferreira ABH.** 2001. Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa. Nova Fronteira, Rio de Janeiro. 4th ed., 2128p.
- Ferry N, Raemackers JM, Majerus MEN, Jouanin L, Port G, Gatehouse A, Gatehouse AMR.** 2003. Impact of oilseed rape expressing the insecticidal cysteine protease inhibitor oryzacystatin on the beneficial predator *Harmonia axyridis* (multicoloured Asian ladybeetle). Molecular Ecology 12:493-504
- Gould F.** 1998. Sustainability of transgenic insecticidal cultivars: integrating pest genetics and ecology. Annual Review of Entomology 43:701-726
- Haughton AJ, Champion GT, Hawes C, Heard MS, Brooks DR, Bohan DA, Clark SJ, Dewar AM, Firbank LG, Osborne JL, Perry JN, Rothery P, Roy DB, Scott RJ, Woiwod IP, Birchall C, Skellern MP, Walker JH, Baker P, Browne EL, Dewar AJG, Garner BH, Haylock LA, Horne SL, Mason NS, Sands RJN, Walker MJ.** 2003. Invertebrate responses to the management of genetically modified herbicide-tolerant and conventional spring crops. II. Within-field epigeal and aerial arthropods. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1863-1877
- Hawes C, Haughton AJ, Osborne JL, Roy DB, Clark SJ, Perry JN, Rothery P, Bohan DA, Brooks DR, Champion GT, Dewar AM, Heard MS, Woiwod IP, Daniels RE, Young MW, Parish AM, Scott RJ, Firbank LG, Squire GR.** 2003. Responses of plants and invertebrate trophic groups to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1899-1913
- Head G, Brown CR, Groth ME, Duan JJ.** 2001. *Cry1Ab* protein levels in phytophagous insects feeding on transgenic corn: implications for secondary exposure risk assessment. Entomologia Experimentalis et Applicata 99:37-45
- Heard MS, Hawes C, Champion GT, Clark SJ, Firbank LG, Haughton AJ, Parish AM, Perry JN, Rothery P, Scott RJ, Skellern MP, Squire GR, Hill MO.** 2003a. Weeds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. I. Effects on abundance and diversi-

- ty. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1819-1832
- Heard MS, Hawes C, Champion GT, Clark SJ, Firbank LG, Haughton AJ, Parish AM, Perry JN, Rothery P, Roy DB, Scott RJ, Skellern MP, Squire GR, Hill MO.** 2003b. Weeds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. II. Effects on individual species. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1833-1846
- Liu Y-B, Tabashnik BE, Dennehy TJ, Patin AL, Bartlett AC.** 1999. Development time and resistance to *Bt* crops. Nature 400:519
- Lohar DP, Schuller K, Buzas DM, Gresshoff PM, Stiller J.** 2001. Transformation of *Lotus japonicus* using the herbicide resistance *bar* gene as a selectable marker. Journal of Experimental Botany 52:1697-1702
- Losey JE, Rayer LS, Carter ME.** 1999. Transgenic pollen harms monarch larvae. Nature 399:214
- Mendelsohn M, Kough J, Vaituzis Z, Matthews K.** 2003. Are *Bt* crops safe? Nature Biotechnology 21:1003-1009
- Morris J** (ed.) 2000. Rethinking Risk and the Precautionary Principle. Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom
- ONU.** 1992. Rio Declaration on Environmental and Development. UN Doc. A/CONF.151/5/Ver.1. United Nations, New York
- Potrykus I.** 2001. Golden rice and beyond. Plant Physiology 125:1157-1161
- Prins M.** Broad virus resistance in transgenic plants. 2003. Trends in Biotechnology 21:373-375
- Rahman MM, Roberts HL, Sarjan M, Asgari S, Schmidt O.** 2004. Induction and transmission of *Bacillus thuringiensis* tolerance in the flour moth *Ephestia kuehniella*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA 101:2696-2690
- Ray JD, Kilen TC, Abel CA, Paris RL.** 2003. Soybean natural cross-pollination rates under field conditions. Environmental Biosafety Research 2:133-138
- Roy DB, Bohan DA, Haughton AJ, Hill MO, Osborne JL, Clark SJ, Perry JN, Rothery P, Scott RJ, Brooks DR, Champion GT, Hawes C, Heard MS, Firbank LG.** 2003. Invertebrates and vegetation of field margins adjacent to crops subject to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1879-1898
- Sandin P.** 1999. Dimensions of the precautionary principle. Human Ecology Risk Assessment 5:889-907
- Schuler TH, Potting RPJ, Denholm I, Poppy GM.** 1999. Parasitoid behaviour and *Bt* plants. Nature 400:825-826
- Squire GR, Brooks DR, Bohan DA, Champion GT, Daniels RE, Haughton AJ, Hawes C, Heard MS, Hill MO, May MJ, Osborne JL, Perry JN, Roy DB, Woiwod IP, Firbank LG.** 2003. On the rationale and interpretation of the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. Philosophical Transactions of the Real Society of London B 358:1779-1799
- Sustein CR.** 2002. The paralyzing principle. Regulation, winter 2002-2003: 32-37
- Tabashnik BE, Carriere Y, Dennehy TJ, Morin S, Sisterson MS, Roush RT, Shelton AM, Zhao JZ.** 2003. Insect resistance to transgenic *Bt* crops: lessons from the laboratory and field. Journal of Economic Entomology 96:1031-1038
- Tepfer M.** 2003. Biosafety considerations relevant to virus-resistant transgenic plant, in particular to tomato resistant to CMV. In: Collection of Biosafety Reviews. ICGEB, Italy, p.84-95
- Tepfer M.** 2002. Risk assessment of virus-resistant transgenic plants. Annual Review of Phytopathology 40:467-491
- Uhrig JF.** 2003 Response to Prins: broad virus resistance in transgenic plants. Trends in Biotechnology 21:376-377
- Vigne E, Komar V, Fuchs M.** 2004. Field safety assessment of recombination in transgenic grapevines expressing the coat protein gene of *Grapevine fanleaf virus*. Transgenic Research 13:165-179
- Welch RM, Graham RD.** 2004. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. Journal of Experimental Botany 55:353-364
- Wilson TMA.** 1993. Strategies to protect crop plants against viruses: pathogen-derived resistance blossoms. Proceedings of the National Academy of Science of USA 90:3134-3141
- Zhao JZ, Cao J, Li Y, Collins HL, Roush RT, Earle ED, Shelton AM.** 2003. Transgenic plants expressing two *Bacillus thuringiensis* toxins delay insect resistance evolution. Nature Biotechnology 21:1493-1497
- Zhao JZ, Collins HL, Tang JD, Cao J, Earle ED, Roush RT, Herrero S, Escriche B, Ferre J, Shelton AM.** 2000. Development and characterization of diamondback moth resistance to transgenic broccoli expressing high levels of *Cry1C*. Applied Environmental Microbiology 66:3784-3789