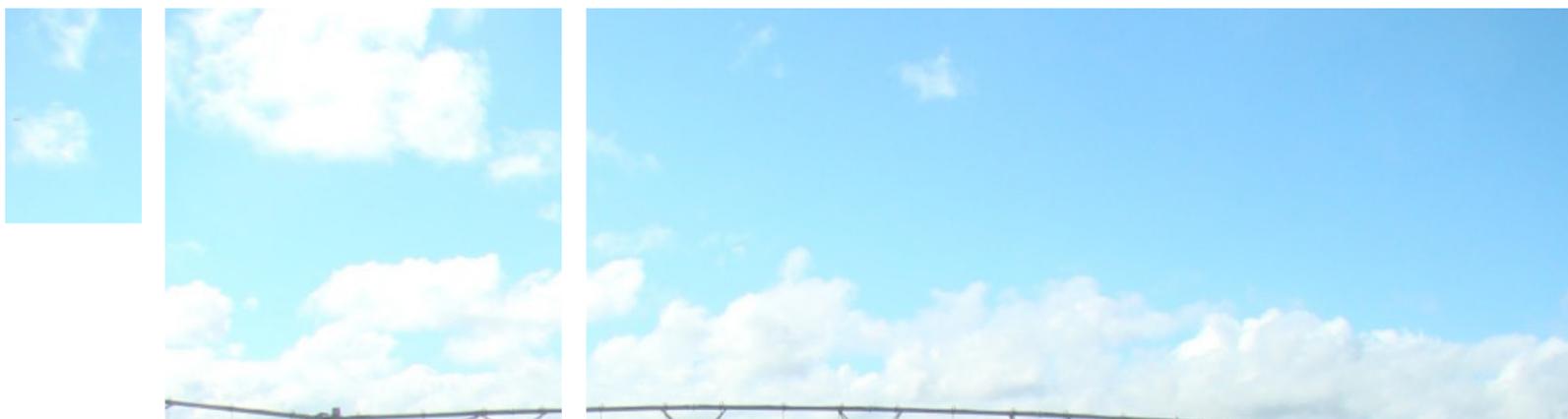


Fatores Importantes na Escolha de Plantas Geneticamente Modificadas com Tecnologia Bt



OBJETIVOS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

2 FOME ZERO E AGRICULTURA SUSTENTÁVEL



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Clima Temperado
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

DOCUMENTOS 522

Fatores Importantes na Escolha de Plantas
Geneticamente Modificadas com Tecnologia Bt

*Indyra Faria de Carvalho
Ana Paula Schneid Afonso da Rosa
Simone Martins Mendes*

Editores Técnicos

Embrapa Clima Temperado
BR 392 km 78 - Caixa Postal 403
CEP 96010-971, Pelotas, RS
Fone: (53) 3275-8100
www.embrapa.br/clima-temperado
www.embrapa.br/fale-conosco

Comitê Local de Publicações

Presidente
Luis Antônio Suita de Castro

Vice-Presidente
Walkyria Bueno Scivittaro

Secretária-executiva
Bárbara Chevallier Cosenza

Membros
*Ana Luiza B. Viegas, Fernando Jackson, Marilaine
Schaun Pelufê, Sônia Desimon*

Revisão de texto
Bárbara Chevallier Cosenza

Normalização bibliográfica
Marilaine Schaun Pelufê

Editoração eletrônica
Nathália Santos Fick (46.431.873/0001-50)

Foto de capa
Ana Paula Afonso

1ª edição
Publicação digital - PDF (2022)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Clima Temperado

C331f Carvalho, Indyra Faria de
Fatores importantes na escolha de plantas
geneticamente modificadas com tecnologia Bt / Indyra
Faria de Carvalho, Ana Paula Schneid Afonso da Rosa,
Simone Martins Mendes. – Pelotas: Embrapa Clima
Temperado, 2022.
19 p. (Documentos / Embrapa Clima Temperado,
ISSN 1516-8840 ; 522)

1. Controle biológico. 2. Praga de planta.
3. Planta transgênica. I. Rosa, Ana Paula Schneid Afonso
da. II. Simone Martins Mendes. III. Série.

CDD 632.9

Autores

Indyra Faria de Carvalho

Engenheira-agrônoma, doutoranda em Fitossanidade, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS.

Ana Paula Schneid Afonso da Rosa

Engenheira-agrônoma, doutora em Entomologia, pesquisadora da Embrapa Clima Temperado, Pelotas, RS.

Simone Martins Mendes

Engenheira-agrônoma, doutora em Entomologia, pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Apresentação

No Brasil, a produção intensiva de grãos coloca o país em posição de destaque, no entanto a ocorrência de pragas, principalmente insetos, pode colocar em risco a produtividade e a sustentabilidade das cadeias produtivas.

Para controle das pragas são usados predominantemente inseticidas químicos sintéticos, o que tem levado a casos repetidos de resistência de pragas às principais classes de inseticidas. Atualmente, dentre as estratégias preconizadas no Manejo Integrado de Pragas (MIP), destacam-se as plantas geneticamente modificadas que expressam proteínas de cristal inseticida e/ou vegetativas derivadas da bactéria *Bacillus thuringiensis*.

Nesse contexto, esta publicação apresenta aos produtores informações e opções relativas às tecnologias Bt (*Bacillus thuringiensis*), disponíveis para controle dos principais insetos-praga das culturas do algodão, cana-de-açúcar, milho e soja em plantas geneticamente modificadas.

A adoção correta da tecnologia contribui para aspectos ambientais, sociais e econômicos associados à meta de, até 2030, garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos e implementar práticas agrícolas resilientes, visando: aumentar a produtividade e a produção; ajudar a manter os ecossistemas; fortalecer a capacidade de adaptação às mudanças climáticas, às condições meteorológicas extremas, secas, inundações e outros desastres; e melhorar progressivamente a qualidade da terra e do solo. Esses esforços alinham-se ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 2 (ODS 2), “acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável”.

Roberto Pedroso de Oliveira
Chefe-Geral
Embrapa Clima Temperado

Sumário

Introdução.....	9
Tecnologia Bt.....	11
Eventos Bt.....	12
Resistência de insetos a plantas Bt.....	15
Manejo da resistência a plantas Bt.....	15
Considerações finais.....	18
Referências.....	18

Introdução

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de plantas transgênicas do mundo, com aproximadamente 56 milhões de hectares de área cultivada em 2020/2021. A taxa de adoção de plantas geneticamente modificadas chega a 98% para soja, 88% para milho e 80% para o algodão (USDA, 2021). As características mais comuns adicionadas a essas culturas são a tolerância a herbicidas e resistência a insetos, separadamente ou combinadas.

As plantas Bt são plantas geneticamente modificadas nas quais foram introduzidos genes específicos da bactéria de solo *Bacillus thuringiensis* (Bt), que promovem na planta a produção de uma proteína tóxica específica para determinados grupos de insetos.

O Brasil está entre os maiores produtores e exportadores de soja (*Glycine max* L.), milho (*Zea mays* L.), cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e algodão (*Gossypium hirsutum* L.) do mundo (Aragão; Contini, 2021).

Vários fatores propiciam o uso das plantas Bt, considerando-se a expansão da área agrícola, a variabilidade de espécies de insetos-pragas e hospedeiros.

A agricultura intensiva nas principais regiões produtoras do País aumentou o rendimento por unidade de área, no entanto tem favorecido a ocorrência de insetos-praga, reduzindo a produtividade das culturas (Mendes et al., 2018a).

Nos agroecossistemas brasileiros, a abundância de hospedeiros e as condições climáticas tropicais ideais permitem que insetos-praga desenvolvam várias gerações ao longo de todo o ano e persistam em todos os estádios fenológicos das plantas (Boregas et al., 2013). Os produtores são desafiados com a ocorrência de uma série de pragas, mas as mais relevantes são as espécies polípagas de lepidópteros, ou seja, lagartas, que são brocas do caule, espigas ou/e desfolhadoras e larvas de coleópteros (larvas de besouro), que se alimentam de raízes (Boregas et al., 2013; Agrofit, 2021).

Dentre as principais espécies danificando a cultura do milho, soja, cana-de-açúcar e algodão (Tabela 1) estão a *Diatraea saccharalis* (Fabricius, 1794), *Helicoverpa zea* (Boddie, 1850), *Helicoverpa armigera* (Hubner, 1808) e *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797), sendo a última a principal praga do milho em regiões tropicais e subtropicais das Américas e da África, causando danos econômicos significativos também na soja e no algodão (Montezano et al., 2018). Em regiões subtropicais na América do Norte, a cultura do milho também sofre danos significativos do coleóptero “vaquinha”, *Diabrotica virgifera virgifera* (LeConte, 1868), sendo a praga principal do milho nos Estados Unidos (EUA) (CABI/EPPO, 2012). Nesse contexto, as principais inovações tecnológicas estão focadas nessas espécies.

Estratégias de manejo de pragas têm dependido intensamente de inseticidas químicos, o que ocasiona a resistência dos insetos a muitas classes de inseticidas, incluindo organofosforados, piretroides, espinosinas, benzoilureia e diamidas (Carvalho et al., 2013; Bolzan et al., 2019; Pereira et al., 2020; APRD, 2022). No entanto, devido ao desenvolvimento e comercialização de plantas geneticamente modificadas que expressam proteínas de cristal inseticida (Cry) e/ou vegetativas (Vip), derivadas da bactéria *Bacillus thuringiensis* (Bt) Berliner, o número de aplicações de inseticidas para o controle de lepidópteros reduziu-se consideravelmente (Chakroun et al., 2016).

Estão catalogados no *Arthropod Pesticide Resistance* (Database, 2020) 144 registros de resistência de *S. frugiperda* a inseticidas químicos e proteínas Bt expressas em plantas transgênicas. Desses registros, 6 se referem à resistência a proteínas Bt e 35 a ingredientes ativos de inseticidas químicos. Isso torna seu manejo um desafio em sistemas integrados de produção, em condições tropicais de cultivo, causando problemas em várias culturas de importância agrícola, como milho, soja, algodão, sorgo (*Sorghum bicolor* L.), arroz (*Oryza sativa* L.), pastagens, entre outras (Mendes et al., 2018a; Boregas et al., 2013).

Atualmente, um dos grandes desafios encontrados pelos produtores para o manejo de *S. frugiperda* é a evolução da resistência às principais estratégias de controle, que é feito basicamente com o uso de inseticidas químicos e plantas transgênicas que expressam a tecnologia Bt (Mendes et al., 2018b).

Tabela 1. Principais pragas do sistema de produção de cultivos do algodoeiro, cana-de-açúcar, milho e soja. Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Algodão	
Nome comum	Espécie
Lagarta-rosca	<i>Agrotis ipsilon</i>
Curuquerê; curuquerê-do-algodoeiro	<i>Alabama argillacea</i>
Bicudo	<i>Anthonomus grandis</i>
Falsa-medideira	<i>Chrysodeixis includens</i>
Lagarta-elasma	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>
Lagarta-do-algodão	<i>Helicoverpa armigera</i>
Broca-grande-do-fruto; broca-grande-do-tomate	<i>Helicoverpa zea</i>
Lagarta-das-maçãs	<i>Heliiothis virescens</i>
Percevejo-marrom	<i>Euschistus heros</i>
Lagarta-das-folhas; lagarta-das-vagens	<i>Spodoptera eridania</i>
Lagarta-do-cartucho; lagarta-militar	<i>Spodoptera frugiperda</i>
Cana-de-açúcar	
Nome comum	Espécie
Broca-da-cana; broca-do-colmo	<i>Diatraea saccharalis</i>
Lagarta-elasma	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>
Cigarrinha-das-folhas; cigarrinha-do-colmo	<i>Mahanarva posticata</i>
Lagarta-do-cartucho; lagarta-militar	<i>Spodoptera frugiperda</i>
Milho	
Nome comum	Espécie
Lagarta-rosca	<i>Agrotis ipsilon</i>
Cigarrinha-do-milho	<i>Dalbulus maidis</i>
Larva-alfinete; vaquinha-verde-amarela	<i>Diabrotica speciosa</i>
Broca-da-cana; broca-do-colmo	<i>Diatraea saccharalis</i>
Broca-do-colo; lagarta-elasma	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>
Lagarta-do-algodão	<i>Helicoverpa armigera</i>
Broca-grande-do-fruto; broca-grande-do-tomate	<i>Helicoverpa zea</i>
Lagarta-do-cartucho; lagarta-militar	<i>Spodoptera frugiperda</i>
Soja	
Nome comum	Espécie
Lagarta-rosca	<i>Agrotis ipsilon</i>
Lagarta-da-soja; lagarta-desfolhadora	<i>Anticarsia gemmatilis</i>
Vaquinha-preta-e-amarela	<i>Cerotoma arcuata</i>
Lagarta-falsa-medideira.	<i>Chrysodeixis includens</i>
Larva-alfinete; vaquinha-verde-amarela	<i>Diabrotica speciosa</i>
Fedorento; percevejo-asa-preta	<i>Edessa meditabunda</i>
Broca-do-colo; lagarta-elasma	<i>Elasmopalpus lignosellus</i>
Percevejo-marrom	<i>Euschistus heros</i>
Lagarta-do-algodão	<i>Helicoverpa armigera</i>

Soja	
Nome comum	Espécie
Broca-grande-do-fruto; broca-grande-do-tomate	<i>Helicoverpa zea</i>
Lagarta-das-maçãs	<i>Heliothis virescens</i>
Lagarta-marrom	<i>Spodoptera cosmioides</i>
Lagarta-das-folhas; lagarta-das-vagens	<i>Spodoptera eridania</i>
Lagarta-do-cartucho; lagarta-militar	<i>Spodoptera frugiperda</i>

Tecnologia Bt

A tecnologia Bt tem como base plantas geneticamente modificadas nas quais são introduzidos genes específicos da bactéria de solo *Bacillus thuringiensis* (Bt), os quais promovem na planta Bt a produção de uma proteína tóxica específica para determinados grupos de insetos. Esses genes produzem dois tipos principais de proteínas inseticidas Bt: as proteínas Cry (proteínas cristalinas) e as proteínas Vip (proteínas inseticidas vegetativas) (Chakroun et al., 2016).

As proteínas Cry são produzidas durante a esporulação das bactérias Bt, quando são formadas inclusões cristalinas, enquanto que as proteínas Vip são produzidas e secretadas durante o estágio vegetativo de crescimento bacteriano (Chakroun et al., 2016). Essas proteínas inseticidas produzidas pela própria planta possuem ação no intestino da lagarta, onde se ligam formando poros que promovem a ruptura dele. Nesse processo de infecção, ocorre a liberação do conteúdo da célula, e o inseto paralisa sua alimentação, mesmo antes da sua morte (Mendes et al., 2018a).

As toxinas do Bt apresentam alta especificidade, e, dentro do mesmo grupo de insetos, a atividade de cada toxina é diferenciada. Atualmente, são conhecidos em torno de 50 tipos de famílias de proteínas Cry, diferenciadas por números, Cry1, Cry2, etc., sendo que cada família atua sobre uma ordem diferente de inseto. Por exemplo, Cry1 e Cry2 atuam sobre lepidópteros; Cry3 sobre coleópteros e Cry4 sobre dípteros (Palma et al., 2014).

Nove genes de proteínas Cry e Vip (Cry1Ab, Cry1F, Cry1a105, Cry2Ab2, VIP3Aa20, Cry1Ac, Cry2Ae, Cry1Da_7 e Cry1B.868) (ISAAA, 2022; Horikoshi et al., 2021) foram utilizados para melhorar a resistência contra lepidópteros-praga, e 6 genes Cry para controle de besouros crisomelídeos que se alimentam de raízes, principalmente *D. virgifera*, expressando proteínas Cry3 (cry3A, Cry3Bb e mcry3A), toxinas binárias Cry34Ab e Cry35Ab e a dsRNA (*double standard* RNA) dsSNF7.

As cultivares Bt de primeira geração produziam uma única proteína inseticida em alta dose, tóxica para um conjunto restrito de pragas, por exemplo a Cry1Ab (evento MON810), que é altamente ativa contra *Ostrinia nubilalis*, e o milho Bt expressando Cry1Fa (Herculex I®) desenvolvido para o cultivo de milho em regiões tropicais para controle de *Spodoptera* spp., que é pouco suscetível a Cry1Ab (Hernández-Rodríguez et al., 2013). No entanto, o uso extensivo de um único transgene acelerou a evolução da resistência, sendo os primeiros casos de resistência à proteína Bt (Cry1F) detectados após apenas alguns anos de comercialização (Farias et al., 2014).

Portanto, as estratégias atuais de gerenciamento de resistência dependem do uso sequencial ou simultâneo de toxinas Bt que não compartilham um local de ação comum. A vantagem da pirâmide de genes é que a resistência pode evoluir mais lentamente do que em plantas que expressam uma única proteína inseticida (Ferré; Van Rie, 2002; Huang et al., 2014). Em comparação com as cultivares Bt de toxina única, as cultivares com múltiplas toxinas podem controlar uma gama mais ampla de pragas, melhorar o controle de espécies de pragas específicas e reduzir os danos às culturas.

As cultivares Bt piramidadas, chamadas de tecnologia Bt de segunda ou de terceira geração, consistem em plantas que expressam conjuntamente mais de uma proteína Bt (por exemplo, Cry1, Cry2, Vip3) com modos de ação independentes no inseto-alvo (Pereira et al., 2018). Também é muito comum o uso de cultivares combinadas com resistência Bt a lepidópteros e resistência a besouros da família Crisomelidae. Essa estratégia permite melhorar a eficácia de controle de uma praga, expandir o espectro de espécies-praga controladas e atrasar o desenvolvimento de resistência das pragas às culturas Bt

Eventos Bt

Atualmente, os eventos Bt têm diferentes níveis de controle para cada espécie de praga-alvo (Boas..., 2019). Por exemplo, ambas as proteínas Cry1F e Cry1Ac em algodão são tóxicas para *Heliothis virescens* (Fabricius, 1781), mas para *S. frugiperda* somente a Cry1F apresenta toxicidade para espécie (Hernández-Rodríguez et al., 2013) (Tabela 2, 3, 4 e 5).

Tabela 2. Eventos Bt disponíveis para controle de espécies-praga em algodão. Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Algodão	
Tecnologias	Evento lepidóptero
Bollgard™ Cotton Ingard™	Cry1Ac
Bollgard II™ Cotton	Cry1a105 +Cry2Ab2
WideStrike™ Cotton	Cry1F+ Cry1Ac
Glytol™ x Twinlink™ x VIPCOT™ Cotton GHB811 x T304-40 x GHB119 x COT102 T304-40 x GHB119 x COT102	Cry1Ab+Cry2Ae+Vip3Aa20
TwinLink™ Cotton Glytol™ x Twinlink™	Cry1Ab+Cry2Ae
Bollgard® III x Roundup Ready™ Flex™ COT102 x MON15985 x MON88913 x MON88701	Cry2Ab2+Vip2Aa20+Cry1Ac
Roundup Ready™ Flex™ Bollgard II™ Cotton	Cry2Ab2+Cry1Ac
281-24-236 x 3006-210-23 x COT102 x 81910 281-24-236 x 3006-210-23 x COT102	Cry1F+VIP3Aa20+Cry1Ac

Tabela 3. Eventos Bt disponíveis para controle de espécies-praga em cana-de-açúcar. Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Cana-de-açúcar	
Tecnologias	Evento lepidóptero
CTB141175/01-A (CTC175-A)	Cry1Ab
CTC91087-6; CTC93209-4	Cry1Ac

Tabela 4. Eventos (lepidóptero e coleóptero) Bt disponíveis para controle de espécies-praga em milho. Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Tecnologias	Milho	
	Evento	
	Lepidóptero	Coleóptero
YieldGard™ MaizeGard™ Agrisure™ CB/LL Agrisure™ GT/CB/LL YieldGard™ CB + RR Bt11 x MON89034	Cry1Ab	-
Agrisure™ CB/LL/RW Bt11 x 5307	Cry1Ab	mcry3A ecry3.1Ab
Agrisure® Viptera™ 311 Agrisure® Viptera™ 2100 MON810 x MIR162	Cry1Ab+VIP3Aa20	-
Agrisure® Viptera™ 3100 Agrisure® Viptera™ 3111 Agrisure® Viptera™ 4	Cry1Ab+VIP3Aa20	mcry3A
TC1507 x MON810; Optimum™ Intrasec	Cry1Ab+Cry1F	
TC1507 x MON810 x MIR162 x NK603 TC1507 x MON810 x MIR162 BT11 x MIR162 x MIR604 x TC1507	Cry1Ab+Cry1F+VIP3Aa20	-
Agrisure® Duracade™ 5222 Bt11 x TC1507	Cry1Ab+Cry1F+VIP3Aa20 Cry1Ab+Cry1F+Cry2Ab2	mcry3A+ecry3.1Ab
BT11 x MIR162 x MIR604 x TC1507 x 5307	Cry1Ab+Cry1F+Cry2Ab2+VIP3Aa20	mcry3A+ecry3.1Ab
Bt11 x MIR162 x MON89034 x GA21	Cry1Ab+Cry1a105+ Cry2Ab2+VIP3Aa20	-
Herculex™ I Herculex™ CB Herculex™ I RR	Cry1F	-
Herculex XTRA™	Cry1F	cry34Ab1+cry35Ab1
SmartStax™ Pro x Enlist™	Cry1F+Cry2Ab2	Cry3Bb1+cry34Ab1+cry35Ab1+dsSNF7
MON89034 x TC1507 x NK603 x MIR162 Power Core™ x MIR162 x Enlist™ MIR162 x MIR604 x TC1507	Cry1F+Cry2Ab2+VIP3Aa20	-
Power Core™ MON89034 x TC1507 x NK603 x DAS40278	Cry1F+Cry1a105+Cry2Ab2	-
Genuity® SmartStax™ MON89034 x GA21	Cry1F+Cry1a105+Cry2Ab2 Cry1a105	Cry3Bb1+cry34Ab1+cry35Ab1
MON87427 x MON89034 x MIR162 x NK603	Cry1a105+VIP3Aa20	
YieldGard™ VT Pro™ Genuity® VT Double Pro™	Cry1a105+Cry2Ab2	-
Genuity® VT Triple Pro™	Cry1a105+Cry2Ab2	Cry3Bb1
MON87427 x MON89034 x MIR162 x MON87411	Cry1a105+Cry2Ab2+VIP3Aa20	Cry3Bb1+dssnf7
Agrisure™ Viptera MIR162 x MIR604	VIP3Aa20 VIP3Aa20	- mcry3A

Tecnologias	Milho	
	Evento	
	Lepidóptero	Coleóptero
MON 95379*	Cry1Da_7+Cry1B.868	mcry3A
MZIR098	-	mcry3A+ecry3.1Ab
MON87411	-	Cry3Bb1+dssnf7
Agrisure® Duracade™	-	ecry3.1Ab

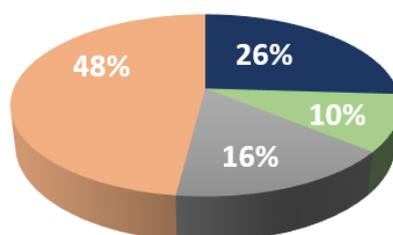
*Não disponível para comercialização até a safra 2021/2022

Tabela 5. Eventos Bt disponíveis para controle de espécies-praga em soja. Empresa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Soja	
Tecnologias	Evento lepidóptero
Intacta™ Roundup Ready™ 2 Pro	Cry1Ac
DAS81419 Conkesta Enlist E3™ Soybean	Cry1F+Cry1Ac
MON-87751-7	Cry1a105
MON-87751-7 x MON-87701-2 x MON87708 x MON89788	Cry2Ab2+Cry1Ac

Por exemplo, os eventos MON 89034, Genuity VT Triple Pro, Monsanto Co. (Cry1A.105 e Cry2Ab2), em que Cry1A.105 causa a supressão de *S. frugiperda* e da lagarta-elasma [*Elasmopalpus lignosellus* (Zeller, 1848)], enquanto que Cry2Ab2 promove controle de *S. frugiperda*, ao mesmo tempo que fornece o espectro de controle fornecido pelos híbridos de milho de campo contendo a proteína Cry1Ab, como para a broca-do-milho europeia (*O. nubilalis*), a broca-do-caule (*D. sacharalis*) e a lagarta-da-espiga do milho (*Helicoverpa zea*) (Drury et al., 2008).

Para a safra 2021/2022, segundo Pereira Filho e Borghi (2021), quanto aos híbridos de milho disponíveis para comercialização, 71% apresentam algum tipo de transgenia e 65% têm a transgenia para resistência a insetos (Figura 1), sendo as toxinas Cry1Ab e Vip3Aa20 presentes na maioria dos materiais.



- Agrisure Viptera 2,3,
- Leptra® / Herculex® / LibertyLink® / YieldGard® / AgrisureViptera
- PowerCore/PwUltra/AgrisureViptera
- Vt Pro, 2 e 3

Figura 1. Percentual de híbridos de milho disponíveis para comercialização na safra 2021/2022 expressando a tecnologia Bt em milho. Empresa Clima Temperado, Pelotas/RS, 2022.

Resistência de insetos a plantas Bt

A ameaça mais séria à eficácia contínua das safras Bt é a evolução da resistência das pragas-alvo. Atualmente, a resistência a Cry1F está disseminada no Brasil e exibe um alto nível de resistência cruzada a Cry1Ab, bem como híbridos de milho que expressam Cry1A.105 / Cry2Ab, Cry1A.105 / Cry2Ab2 / Cry1F e Vip3Aa20 / Cry1Ab. Isso ocorre porque as proteínas Cry1 compartilham o mesmo sítio de ligação no intestino das lagartas, com 72% de similaridade entre as sequências de aminoácidos das proteínas Cry1F e Cry1A. Assim, a maioria dos casos de alto nível de resistência são devidos à diminuição da ligação da toxina aos receptores do intestino. A lagarta-do-cartucho do milho desenvolveu resistência à maioria dos híbridos de milho Bt apenas três anos após o lançamento no Brasil (Fatoreto et al., 2017).

Apesar da alta adoção de culturas Bt no Brasil, existe um consenso de que o plantio da área de refúgio vem sendo negligenciado. A estratégia de refúgio, cultivo da lavoura não Bt próxima à lavoura Bt, é recomendada para retardar o desenvolvimento da resistência às culturas Bt. Além disso, nem todas as proteínas Bt são de alta dose para lagarta-do-cartucho. Portanto, essa proteína, quando expressa na planta, não causa 100% de mortalidade dos insetos que se alimentam dela. A rápida evolução da resistência às toxinas Cry exige aplicações adicionais de inseticidas durante a safra.

Considerando-se que a alteração da ligação ao intestino médio do inseto é a etapa que tem sido mais frequentemente associada à resistência às proteínas Cry, as chances de resistência cruzada entre modos de ação diferentes são baixas (embora outros mecanismos de resistência não possam ser descartados) (McGauchey; Whalon, 1992; Tabashnik, 1994).

No entanto, em alguns casos, plantas que expressam mais de uma proteína não se enquadram no conceito de eventos piramidados (Roush, 1998; Brévault et al., 2013).

Isso ocorre quando as proteínas inseticidas presentes na planta Bt piramidada apresentam resistência cruzada a outra proteína Bt e/ou a expressão de uma das proteínas é insuficiente para controlar insetos resistentes a uma determinada proteína (Gould, 1998; Tabashnik et al., 2009). Esse fato foi observado em lagartas resistentes ao milho YieldGard VT PRO expressando Cry1A.105/Cry2Ab e no milho Power Core expressando Cry1A.105/Cry2Ab2/Cry1F.

O aumento da resistência a inseticidas é resultado da forte pressão seletiva em resposta a pulverizações frequentes com inseticidas pertencentes a poucos modos de ação e à alta adoção de culturas Bt com baixa conformidade para áreas de refúgio. A rápida evolução da resistência a muitos inseticidas sintéticos e proteínas inseticidas desafia o controle de pragas no Brasil. Portanto, para garantir que gerações sucessivas da praga não sejam expostas ao(s) mesmo(s) inseticida(s), é importante compreender o cenário de manejo de resistência em alinhamento com a chamada 'abordagem de janela de tratamento de modo de ação'.

Manejo da resistência a plantas Bt

A estratégia de refúgio é a principal ferramenta dos programas de Manejo de Resistência de Insetos (MRI) usada para retardar a resistência de pragas às lavouras Bt (Figura 2). Essa estratégia é baseada no princípio de que os refúgios, que consistem em plantas hospedeiras não-Bt cultivadas próximas ou em lavouras de culturas Bt, produzem insetos suscetíveis, que se acasalam com os raros indivíduos resistentes que sobrevivem nas culturas Bt. Nesse sentido, todas as estratégias de manejo que visem reduzir o número de indivíduos resistentes e aumentar os suscetíveis na área podem ser consideradas como MRI.

O objetivo é manter uma população de pragas suscetíveis ao efeito inseticida da cultivar transgênica e preservar os benefícios da tecnologia. Sem o plantio da área de refúgio, nas primeiras safras da lavoura Bt, a tecnologia irá proporcionar um controle efetivo dos insetos. Porém, a médio prazo, insetos naturalmente resistentes e raros conseguem sobreviver e se tornar maioria na população. Após algumas gerações, isso leva à perda

da eficácia da tecnologia (RMR, 2015). Por isso, todo produtor que utiliza tecnologias Bt deve adotar áreas de refúgio, pois a manutenção da eficácia das tecnologias em cada região é a consequência do manejo de cada propriedade (Boas..., 2021).

O percentual da área que deve ser usada como refúgio varia conforme o tipo de evento transgênico utilizado. Características como a cultura, o número de toxinas expressas e as recomendações das empresas desenvolvedoras são alguns dos fatores que influenciam a parcela da área que será plantada com essa finalidade. As áreas de refúgio devem estar localizadas a uma distância máxima de 800 metros da lavoura com tecnologia Bt, e a planta deve ser da mesma espécie, além de ter ciclo e porte igual ao da variedade Bt. Para cada cultura Bt plantada, há uma porcentagem recomendada em relação à área total cultivada na propriedade. Para o algodão, soja e cana-de-açúcar, recomenda-se 20% e para o milho o indicado é 10% (Mendes et al., 2019, 2018a, 2008b).

As áreas de refúgio podem ser manejadas como o restante da lavoura, com pulverizações de inseticidas ou a adoção de outros métodos de controle, sempre que as populações das pragas atingirem o nível de dano econômico (NDE) (Boas..., 2021).

A tomada de decisão e a escolha das estratégias de manejo do refúgio vai depender do monitoramento da praga na lavoura, pois é a partir dessa triagem que o NDE é identificado, assim como o momento certo de adotar medidas de supressão da praga, principalmente no controle químico.

Para os cultivos Bt, o monitoramento é ainda mais importante, pois lagartas que acabaram de eclodir e que estão no início do desenvolvimento ainda precisam se alimentar da planta para ter o contato com as proteínas Bt e serem controladas. Sendo assim, lagartas nesses estágios de vida não devem ser consideradas no NDE das áreas Bt. No entanto, quando é realizado o monitoramento nas áreas de refúgio, as lagartas no início do ciclo de vida precisam ser consideradas, uma vez que as proteínas Bt não estão presentes.

Em ambos os casos Bt ou refúgio, quando o NDE for atingido mais de uma vez e mais de uma aplicação inseticida for necessária, deve-se alternar os modos de ação respeitando-se as janelas de aplicação, de maneira a evitar a seleção da resistência. Além disso, o milho piramidado expressando toxinas Bt com baixa resistência cruzada a Cry1F pode ser preferido.

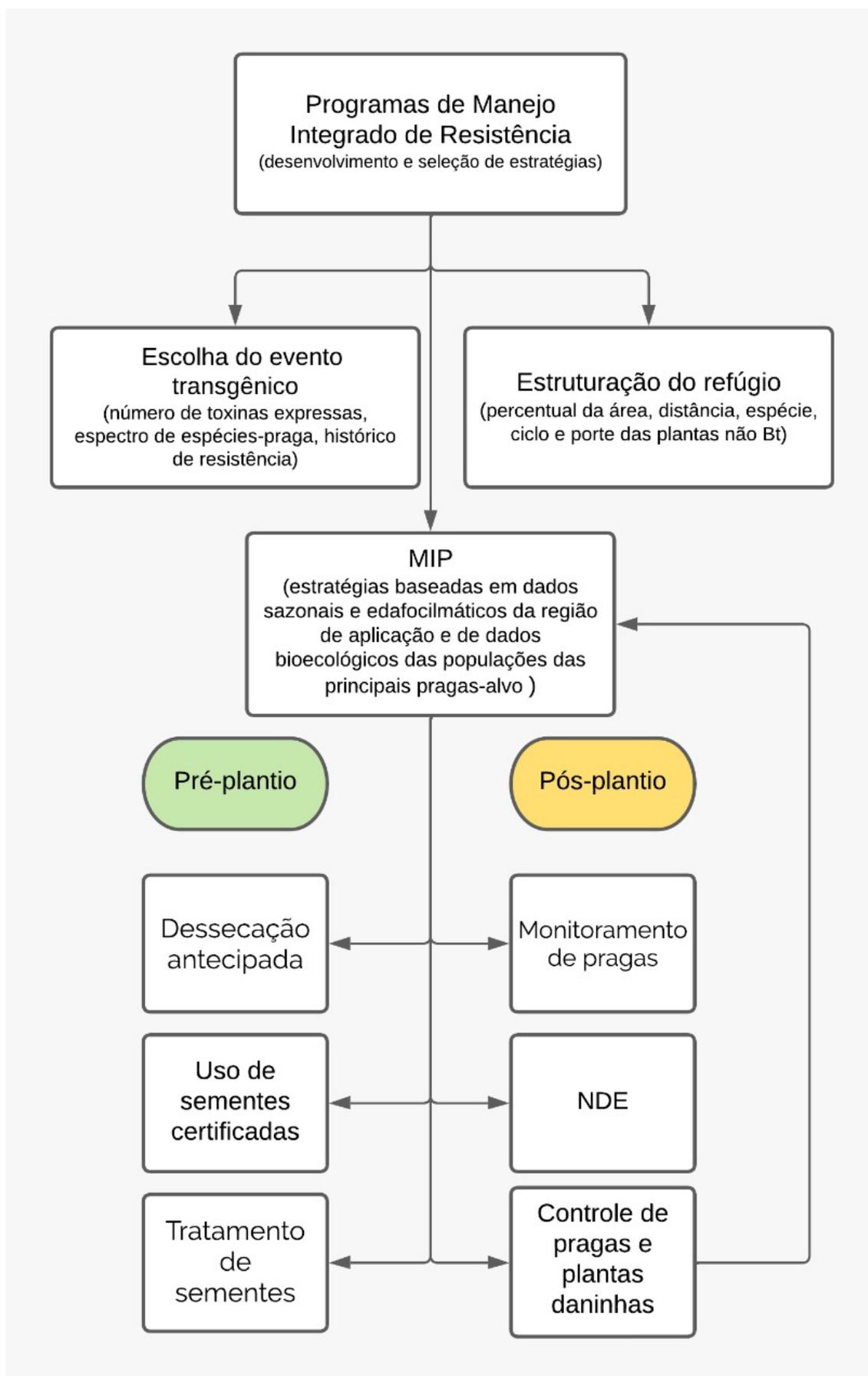


Figura 2. Diagrama de Manejo de Resistência de Insetos (MIR) a plantas Bt. Arte gráfica: Indyra Faria de Carvalho

Considerações finais

A utilização de plantas Bt é apenas um dos componentes do MIP. O manejo de pragas se dá pela utilização de um conjunto de táticas. De modo algum, práticas isoladas podem garantir o sucesso da manutenção dos níveis populacionais abaixo do nível de dano. Cabe ressaltar que, quando foram utilizadas plantas Bt, a área de refúgio deve ser respeitada para que se possa aumentar a vida útil da tecnologia e, assim, dispor, por um período maior, de mais opções para controle de pragas limitantes à produção agrícola.

Referências

- ARAGÃO, A.; CONTINI, E. **O agro no Brasil e no mundo: uma síntese do período de 2000 a 2020.** [Brasília, DF: Embrapa, 2021]. Slides. Disponível em: <https://www.embrapa.br/documents/10180/62618376/O+AGRO+NO+BRASIL+E+NO+MUNDO.pdf/41e20155-5cd9-f4ad-7119-945e147396cb>. Acesso em: 4 abr. 2022.
- AGROFIT. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 4 abr. 2022.
- APRD (Arthropod Pesticide Resistance Database). Disponível em: <https://www.pesticideresistance.org/>. Acesso em: 4 abr. 2022.
- BOAS PRÁTICAS AGRONÔMICAS. **Plantas Bt: o que são e para que servem.** 2019. Disponível em: <https://boaspraticasagronicas.com.br/noticias/plantas-bt/>. Acesso em: 4 abr. 2022.
- BOAS PRÁTICAS AGRONÔMICAS. **Saiba tudo sobre Manejo de Resistência a Insetos em milho Bt.** 22 nov. 2021. Disponível em: <https://boaspraticasagronicas.com.br/noticias/tire-suas-duvidas-sobre-manejo-de-resistencia-de-insetos-em-lavouras-de-milho-bt/>. Acesso em: 4 abr. 2022.
- BOLZAN, A.; PADOVEZ, F. E. O.; NASCIMENTO, A. R. B.; KAISER, I. S.; LIRA, E. C.; AMARAL, F. S. A.; KANNO, R. H.; MALAQUIAS, J. B.; OMOTO, C. Selection and characterization of the inheritance of resistance of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) to chlorantraniliprole and cross-resistance to other diamide insecticides. **Pest Management Science**, v. 75, n. 10, p. 2682-2689, out. 2019.
- BOREGAS, K. G. B.; MENDES, S. M.; WAQUIL, J. M.; FERNANDES, G. W. Estádio de adaptação de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) em hospedeiros alternativos. **Bragantia**, v. 72, p. 61-70, mar. 2013.
- BRÉVAULT, T.; HEUBERGER, S.; ZHANG, M.; ELLERS-KIRK, C.; NI, X.; MASSON, L.; LI, X.; TABASHNIK, B. E.; CARRIÈRE, Y. Potential shortfall of pyramided transgenic cotton for insect resistance management. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 15, p. 5806-5811, 9 abr. 2013.
- CABI/EPPO. Diabrotica virgifera virgifera. [Distribution map]. **Distribution Maps of Plant Pests**, n. June, 1 Aug. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1079/DMPP/20123252646>
- CARRIÈRE, Y.; CROWDER, D. W.; TABASHNIK, B. E. Evolutionary ecology of insect adaptation to Bt crops. **Evolutionary Applications**, v. 3, n. 5-6, p. 561-573, set. 2010.
- CARVALHO, R. A.; OMOTO, C.; FIELD, L. M.; WILLIAMSON, M. S.; BASS, C. Investigating the molecular mechanisms of organophosphate and pyrethroid resistance in the fall armyworm *Spodoptera frugiperda*. **Plos One**, v. 8, n. 4, e62268, abr. 2013.
- CHAKROUN, M.; BANYULS, N.; BEL, Y.; ESCRICHE, B.; FERRÉ, J. Bacterial vegetative insecticidal proteins (Vip) from entomopathogenic bacteria. **Microbiology and molecular biology reviews: MMBR**, v. 80, n. 2, p. 329-350, jun. 2016.
- DRURY, S. M.; REYNOLDS, T. L.; RIDLEY, W. P.; BOGDANOVA, N.; RIORDAN, S.; NEMETH, M. A.; SORBET, R.; TRUJILLO, W. A.; BREEZE, M. L. Composition of forage and grain from second-generation insect-protected corn MON 89034 is equivalent to that of conventional corn (*Zea mays* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 12, p. 4623-4630, 1 jun. 2008.
- FARIAS, J. R.; ANDROW, D. A.; HORIKOSHI, R. J.; SORGATTO, R. J.; FRESIA, P.; SANTOS, A. C.; OMOTO, C. Field-evolved resistance to Cry1F maize by *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Brazil. **Crop Protection**, v. 64, p. 150-158, 2014.
- FATORETTO, J. C.; MICHEL, A. P.; SILVA FILHO, M. C.; SILVA, N. Adaptive potential of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) limits Bt trait durability in Brazil. **Journal of Integrated Pest Management**, v. 8, n. 1, jan. 2017.
- FERRÉ, J.; VAN RIE, J. Biochemistry and genetics of insect resistance to *Bacillus thuringiensis*. **Annual Review of Entomology**, v. 47, n. 1, p. 501-533, jan. 2002.
- GOULD, F. Sustainability of transgenic insecticidal cultivars: integrating pest genetics and ecology. **Annual Review of Entomology**, v. 43, n. 1, p. 701-726, jan. 1998.
- HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, C. S.; HERNÁNDEZ-MARTINEZ, P.; VAN RIE, J.; ESCRICHE, B.; FERRÉ, J. Shared midgut binding sites for Cry1A.105, Cry1Aa, Cry1Ab, Cry1Ac and Cry1Fa proteins from *Bacillus thuringiensis* in two important corn pests, *Ostrinia nubilalis* and *Spodoptera frugiperda*. **Plos One**, v. 8, n. 7, p. e68164, 5 jul. 2013.

HORIKOSHI, R. J.; VERTUAN, H.; CASTRO, A. A. de; MORRELL, K.; GRIFFITH, C.; EVANS, A.; TAN, J.; ASIIMWE, P.; JOSÉ, M. O. M. A.; DOURADO, P. M.; BERGER, G.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. A new generation of *Bt* maize for control of fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*). **Pest Management Science**, v. 77, n. 8, p. 3727-3736, ago. 2021.

HUANG, F.; QURESHI, J. A.; MEAGHER Jr., R. L.; REISIG, D. D.; HEAD, G. P.; ANDOW, D. A.; NI, X.; KERNS, D.; BUNTIN, G. D.; NIU, Y.; YANG, F.; DANGAL, V. Cry1F resistance in fall armyworm *Spodoptera frugiperda*: Single gene versus Pyramided Bt Maize. **PLOS ONE**, v. 9, n. 11, p. e112958, 17 nov. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112958>

ISAAA. **Genes List** (GM Approval Database). Disponível em: <https://www.isaaa.org/gmapprovaldatabase/geneslist/default.asp>. Acesso em: 5 abr. 2022.

MENDES, S. M.; MARUCCI, R. C.; WAQUIL, J. M. Manejo de pragas nos sistemas de produção de milho no Brasil: inovações tecnológicas no manejo de lagartas em lavouras de milho convencional e Bt. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 32., 2018, Lavras. Soluções integradas para os sistemas de produção de milho e sorgo no Brasil: livro de palestras. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2018a. p. 260-280.

MENDES, S. M.; MARUCCI, R. C.; WAQUIL, J. M. Lagartas em alta. **Cultivar Grandes Culturas**, Pelotas, ano 19, n. 234, p. 30-32, nov. 2018b.

MENDES, S. M.; WAQUIL, J. M.; OLIVEIRA, I. R. de; VIANA, P. A. Manejo de pragas no milho de segunda safra: com ou sem a utilização de milho Bt. **Revista Plantio Direto**, v. 29, n. 168, p. 4-8, 2019.

MONTEZANO, D. G.; SPECHT, A.; SOUZA-SILVA, J. C.; SÓSA-GOMEZ, D. R.; ROQUE-SPECHT, V. F.; PAULA-MORAES, S. V. de P.; PETERSON, J. A.; HUNT, T. E. Host plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. **African Entomology**, v. 26, n. 2, p. 286-300, set. 2018.

PALMA, L.; MUÑOZ, D.; BERRY, C.; MURILLO, J.; CABALLERO, P. *Bacillus thuringiensis* toxins: An overview of their biocidal activity. **Toxins**, v. 6, n. 12, p. 3296-3325, 11 dez. 2014.

PEREIRA FILHO, I. A.; BORGHI, E. **Levantamento de cultivares de milho para o mercado de sementes**: safra 2020/2021. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2021. 19 p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 263).

PEREIRA, E. J. G.; SILVA, N. R. da; AMAYA, O. F. S.; RABELO, M. M. **Manejo de resistência de insetos à tecnologia Bt**: conhecer, entender e agir para manter a sua vantagem. 2018. Disponível em: <http://www.pioneersementes.com.br/blog/177/manejo-de-resistencia-de-insetos-a-tecnologia-bt-conhecer-entender-e-agir-para-manter-a-sua-vantagem>. Acesso em: 4 abr. 2022.

PEREIRA, R. M.; ABBADE NETO, D.; AMADO, D.; DURIGAN, M. R. Baseline susceptibility and frequency of resistance to diamide insecticides in *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Brazil. **Crop Protection**, v. 137, p. 105266, 1 nov. 2020.

ROUSH, R. T. Two-toxin strategies for management of insecticidal transgenic crops: can pyramiding succeed where pesticide mixtures have not? **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 353, n. 1376, p. 1777-1786, 29 out. 1998.

RMR. Why is Bt Corn Refuge Compliance so Important? 2015. Disponível em: <https://cropwatch.unl.edu/resistance-management-refuges>. Acesso em: 4 abr. 2022.

TABASHNIK, B. E. Evolution of resistance to *Bacillus thuringiensis*. **Annual Review of Entomology**, v. 39, n. 1, p. 47-79, jan. 1994.

TABASHNIK, B. E.; VAN RENSBURG, J. B. J.; CARRIÈRE, Y. Field-evolved insect resistance to Bt Crops: Definition, theory, and data. **Journal of Economic Entomology**, v. 102, n. 6, p. 2011-2025, 1 dez. 2009.

USDA. Brazil: Agricultural Biotechnology Annual. 2021. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-agricultural-biotechnology-annual-4>. Acesso em: 4 abr. 2022.



Clima Temperado



Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



CGPE: 017737