

**SUSCETIBILIDADE DE POPULAÇÕES DE *SPODOPTERA FRUGIPERDA*
(LEPIDOPTERA: NOCTUIDAE) DO MARANHÃO, TOCANTINS, PIAUÍ E
BAHIA A CULTIVARES DE MILHO TRANSGÊNICO COM TOXINAS CRY/VIP
DE *BACILLUS THURINGIENSIS***



10.56238/edimpacto2025.015-004

Alisson Franco T. da Silva
Campus Professora Cinobelina Elvas
Universidade Federal do Piauí

Luciana B. Silva
Campus Professora Cinobelina Elvas
Universidade Federal do Piauí
lubarbosabio@ufpi.edu.br

José B. Malaquias
Entomology Laboratory
Center for Agrarian Sciences
Universidade Federal da Paraíba
malaquias.josebruno@gmail.com

Angélica S. Salustino
Entomology Laboratory
Center for Agrarian Sciences
Universidade Federal da Paraíba
angelicasalustino@gmail.com

Domingos Francisco Correia Neto
Entomology Laboratory
Center for Agrarian Sciences
Universidade Federal da Paraíba
correira.neto@ufpb.br

Daniel M. Pacheco
Campus Professora Cinobelina Elvas
Universidade Federal do Piauí
marquesdaniel@ufpi.edu.br

Daniel B. Fragoso
Embrapa Tocantins
daniel.fragoso@embrapa.br

RESUMO

Em alguns países, a utilização de cultivares transgênicos de milho, algodão e soja aumentou bastante nos últimos anos, alcançando níveis de adoção acima de 90% em muitas regiões, impondo intensa pressão de seleção para resistência nas populações dos insetos alvo. A lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), é um inseto polífago e migratório de importância econômica global. Suas populações no Brasil representam um dos principais alvos de controle das proteínas inseticidas (toxinas) de *Bacillus thuringiensis* Berliner (Bt) produzidas em cultivares transgênicos. Além disso, a maioria desses cultivos recebem aplicações de inseticidas sintéticos contra um universo complexo de insetos-praga e é baixa a adoção de áreas de refúgio não-Bt. Diversos cultivares de milho Bt das primeira e segunda gerações (com toxinas Cry tais como Cry1F, Cry1Ab e Cry1A.105 + Cry2Ab2) perderam eficácia contra populações de *S. frugiperda* pela seleção de resistência a Bt. Atualmente, relatos levam a suspeita que falhas de controle da *S. frugiperda* associadas ao evento de resistência também acomete as atuais cultivares de milho Bt de terceira geração, que produzem conjuntamente as toxinas Vip e Cry. Apesar da toxina Vip originalmente apresentar eficácia contra as lagartas resistentes às toxinas Cry, pelo menos as lagartas nos estágios iniciais, a perda da eficácia dessas toxinas torna os milhos Bt Vip/Cry mais vulneráveis à seleção de resistência a Bt nas populações de *S. frugiperda*. Assim, é crucial obter dados regionais e confiáveis da suscetibilidade das populações do inseto para informar tomadas de decisão sobre práticas de manejo. O primeiro objetivo neste estudo foi investigar o status de suscetibilidade de populações de campo de *S. frugiperda* de locais com pressão de seleção com milho Bt Vip/Cry por mais de cinco anos. Utilizou-se bioensaios de tempo-mortalidade com lagartas de terceiro ínstar descendentes F₁ de seis populações coletadas em campos de milho da região MATOPIBA, uma fronteira agrícola tropical que abrange quatro estados brasileiros, Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Os insetos foram avaliados em bioensaios longitudinais tempo-mortalidade. O tempo para morte das lagartas de terceiro ínstar de *S. frugiperda* foi relativamente curto, com taxas de mortalidade de 98–100% em menos de cinco dias, independentemente do híbrido de milho Bt contendo três combinações de Cry1Ab, Cry1F, Cry2Ab e Vip3Aa. No entanto, o tempo médio de sobrevivência (ST₅₀) das lagartas diferiu entre as populações, com os valores mais baixos e mais altos de ST₅₀ ocorrendo para as populações PI-Cr (42 h ou 1,75 dias) e PI-Ur (66–90 h ou 2,75–3,75 dias), respectivamente. Portanto, as lagartas de terceiro ínstar da geração F₁ das populações de *S. frugiperda* foram suscetíveis à folhagem de milho que produz Vip3Aa/Cry, e a suscetibilidade mais contrastante ocorreu nos insetos do estado do Piauí. Esses resultados indicam que a progénie de *S. frugiperda* de áreas altamente pressionadas com híbridos de milho Bt Vip3Aa/Cry é morta na folhagem de milho que produz proteínas Bt Vip3Aa e Cry, apesar dos relatos de campo de aumento de injúrias foliares pelas lagartas em algumas localidades. Diante desses resultados e das reclamações de produtores e técnicos, surgiu o questionamento se há alteração na suscetibilidade às toxinas Bt em outros instares larvais do inseto, principalmente aqueles mais tardios, supostamente mais tolerantes a Bt. Assim, o segundo capítulo teve por objetivo investigar se há variação na sobrevivência larval do primeiro ao quarto instar das lagartas de *S. frugiperda*, utilizando a geração F₁ de cinco populações geograficamente distintas coletadas em campos de milho da região do MATOPIBA. Observou-se variação na suscetibilidade nos demais instares avaliados, evidenciada nas curvas de sobrevivência e na mortalidade após sete dias de contato das lagartas com a folhagem dos milhos Bt. As maiores variações e o menor percentual de mortalidade foram encontrados na população da Bahia de quarto instar e na população de Piauí-Ur no primeiro e quarto instar e houve heterogeneidade no padrão de mortalidade entre os instares dependendo do tipo milho Bt e da população do inseto. Portanto, não se detectou diminuição da suscetibilidade dos insetos nos instares tardios, reforçando a conclusão geral de suscetibilidade das populações coletados nos estados do MATOPIBA. Os resultados deste estudo auxiliam no entendimento do risco de evolução da resistência



a Vip3A e no refinamento de modelos matemáticos para o uso sustentável das culturas Bt, ferramenta de manejo de insetos segura à saúde humana e ao meio ambiente. Mais estudos serão necessários para investigar a indesejável presença e injúria de *S. frugiperda* nos cultivos de milho a geração de ferramentas para o manejo da resistência de *S. frugiperda* ao milho Bt.

Palavras-chave: Lagarta-do-cartucho. Manejo de insetos. Matopiba. Proteínas inseticidas. *Zea mays*.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae), é uma praga polífaga, de comportamento migratório e versátil que ataca estágios vegetativos e reprodutivos de diversas culturas e plantas silvestres (Montezano *et al.*, 2018; Kenis *et al.*, 2023). *Spodoptera frugiperda* constitui uma preocupação global devido à sua capacidade migratória e polifagia. Embora nativa das Américas, o inseto se espalhou mundialmente, invadindo recentemente a África, Ásia e a Austrália e está presente em mais de duzentos países (Wan *et al.*, 2021; Kenis *et al.*, 2023). Desde meados dos anos 2000 que cultivares de milho e algodão transgênicos produzindo proteínas inseticidas com *Bacillus thuringiensis* (Bt) têm sido o principal método de controle para essas duas culturas nas Américas (ISAAA, 2019; Huang, 2021).

Antes do uso de culturas transgênicas, o controle de *S. frugiperda* nas Américas baseava-se principalmente em inseticidas sintéticos e, ao longo dos anos, populações resistentes deste inseto foram selecionadas a muitas das principais classes de inseticidas (Pitre, 1988; Yu, 1991; Berta *et al.*, 2000; Belay, 2012; Bernardi *et al.*, 2016a; Gutiérrez-Moreno *et al.*, 2019), incluindo carbamatos, organofosforados e piretroides (Sogorb *et al.*, 2002). Atualmente, muitos países, principalmente o Brasil, adotaram culturas transgênicas que expressam proteínas Bt para o manejo desse inseto (Huang, 2021). Devido à adoção em larga escala dessas culturas, em muitas regiões, alcançando mais de 90%, é intensa a pressão de seleção para resistência e populações de *S. frugiperda* às proteínas Bt. De fato, ocorreu rápido o surgimento de resistência em populações de *S. frugiperda* ao milho Cry1F (tecnologia TC1507 ou Herculex) com problemas de controle em campo em Porto Rico, nos EUA continental, Brasil e Argentina (Storer *et al.*, 2010; 2012; Farias *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2014; Bernardi *et al.*, 2016b; Omoto *et al.*, 2016; Chandrasena *et al.*, 2018; Amaral *et al.*, 2020; Huang, 2021).

Estudos anteriores mostraram resultados sobre a suscetibilidade ou resistência de populações de campo de *S. frugiperda* em relação a características de milho Bt simples (de uma toxina Bt) e piramidado (contendo combinações delas). Há evidências de resistência a proteína Cry1F em larga escala nas populações das Américas, além de resistência cruzada ao milho Cry1A.105/Cry2Ab2 (tecnologia PRO) (Bernardi *et al.*, 2015; Santos-Amaya *et al.*, 2015). Alguns estudos relatam suscetibilidade às proteínas Cry2A e Vip3Aa20 (Huang *et al.*, 2014). Por exemplo, Li *et al.* (2016) avaliaram populações de *S. frugiperda*, relatando suscetibilidade a Cry2A e Vip3Aa20, mas resistentes a Cry1A.105 e Cry1F. Uma investigação similar foi conduzida utilizando o milho, contendo Vip3Aa20 e Cry1Ab, todas as populações foram suscetíveis às combinações de toxinas que continham Vip3Aa20 (Yang *et al.*, 2013). Zhu *et al.* (2019) avaliaram a sobrevivência e estimaram o nível de dominância efetiva da resistência de três genótipos diferentes de *S. frugiperda*: um suscetível a Bt, um resistente aos genes duplos Cry1A.105/Cry2Ab2, e linhas heterozigotas F₁ em cinco híbridos de milho

piramidados expressando proteínas Cry1A, Cry2A, Cry1F, e Vip3, concluindo que a Vip3Aa20 é a única proteína completamente ativa contra a *S. frugiperda*.

O método de bioensaio com tecido foliar de milho é comumente usado em estudos relacionados à resistência a Bt. Horikoshi *et al.* (2021) testaram a eficácia de um cultivar expressando os genes duplos Cry1B.868 e Cry1Da_7, e linhas experimentais de genes únicos expressando Cry1B.868 ou Cry1Da_7 em uma população de *S. frugiperda* suscetível no Brasil, mostrando controle satisfatório. Outro estudo realizado no Brasil, em 2015, determinou a suscetibilidade de populações de campo de *S. frugiperda* a Cry1Ab usando o método de bioensaio de tecido foliar, com eficácia de controle em torno de 88,4% em 5 dias (Omoto *et al.*, 2016). Nos EUA, Niu *et al.* (2018) avaliaram o desempenho de *S. frugiperda* expostas ao cultivar contendo as proteínas Cry1A.105/Cry2Ab2 usando bioensaio de tecido foliar para acessar os custos de adaptação e níveis de dominância da resistência.

O somatório das investigações realizadas em diferentes partes do mundo mostrou que a resistência a Cry1F nas lagartas é completamente superada pela eficiência de controle devido a ausência de resistência cruzada nas plantas que produzem Vip ou em bioensaios com a proteína Vip purificada. Isso foi evidência para propor que a proteína Vip pode ser usada para manejar a resistência a Cry em *S. frugiperda* e as empresas optaram pela estratégia da “piramidização” dessas proteínas nas plantas. É importante ressaltar que a estratégia de piramidização de genes para o manejo de resistência necessita de uma seleção cuidadosa de genes Bt a serem empilhados (piramidados) nas plantas (Niu *et al.*, 2013; Bernardi *et al.*, 2015; Santos-Amaya *et al.*, 2022).

Estudos sobre o status da susceptibilidade e/ou resistência a Bt em populações de *S. frugiperda* no Brasil têm como objetivo avaliar os níveis atuais de resistência/suscetibilidade nas principais regiões produtoras de milho. Além disso, esses estudos procuram analisar as correlações entre resistência/suscetibilidade e vários fatores potencialmente associados à seleção de populações resistentes. Esses fatores incluem a raça/genótipo de *S. frugiperda* que ocorre localmente (raça milho versus arroz), pressão de seleção das culturas Bt, padrões de migração, histórico de plantio de culturas Bt, localização geográfica e hábitos de sobrevivência dos insetos na entressafra.

Compreender as mudanças na suscetibilidade às toxinas Bt durante o desenvolvimento larval nas populações *S. frugiperda* pode ajudar a prever o desempenho de certas configurações de refúgio e outras estratégias para o manejo da resistência em áreas de agricultura tropical, com alta incidência de *S. frugiperda*. No presente estudo foi avaliado se há alterações na suscetibilidade à toxina Bt durante o desenvolvimento larval, da geração F₁, em diferentes populações de *S. frugiperda* coletadas em uma região de fronteira agrícola tropical que abrange quatro estados brasileiros, Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (MATOPIBA).

O primeiro objetivo foi coletar populações de campo de *S. frugiperda* em diferentes locais da região do MATOPIBA, e realizar bioensaios laboratoriais, com lagartas de terceiro instar da geração

F₁, para determinar a susceptibilidade a cultivares de milho contento as combinações das proteínas Bt (Cry1F, Cry1A.105, Cry1Ab, Cry2Ab2, Cry3Bb1, Vip3Aa20). A partir dos resultados obtidos, foi levantada a pergunta, se há variação na suscetibilidade à toxina Bt nos diferentes instares larvais.

O conhecimento gerado a partir destes estudos auxiliarão no entendimento do status atual e os fatores relacionados ao manejo de *S. frugiperda*, e assim preservar a tecnologia de culturas Bt para o controle de *S. frugiperda* na região do MATOPIBA, no Brasil e no mundo.

2 ESTRATÉGIA EXPERIMENTAL

Foi realizado um estudo sobre a sobrevivência de lagartas de *S. frugiperda* em folhagem de milho Bt Vip3Aa20/Cry e controle, não-Bt, em sistema de blocos casualizados. Para isso, usamos cultivares isogênicos do milho (i.e., que tem mesmo fundo genético, exceto pelo transgene inserido no genoma do milho Bt). O milho Bt foi plantado em casa de vegetação para ser utilizado nos bioensaios. As lagartas foram coletadas em campos de milho e mantidas em laboratório, alimentadas com dieta artificial até completarem o ciclo. Da mesma forma que as neonatas foram mantidas em dieta artifical até atingirem o terceiro instar. Foram usadas populações de lagartas coletadas na região de Balsas/MA, Porto Nacional/TO, Baixa Grande/PI, Currais/PI, Uruçuí/PI e Luis Eduardo Magalhães/BA para os ensaios com lagartas de terceiro instar. Indivíduos de populações da região do MATOPIBA foram usadas para o trabalho. Esse esforço amostral foi concentrado nas safras 2/2021, 1/2022 e safra 2/2022, o que corresponde aproximadamente à primeira e segunda safras no Brasil.

Foi mensurada a sobrevivência e o tempo letal mediano das lagartas de terceiro instar da geração F₁ das populações coletadas nos campos de milho da região do Matopiba, semelhante à metodologia de Tavares *et al.*, (2021).

Na segunda etapa, foram realizados os ensaios com os demais instares utilizando as mesmas populações, com coletas realizadas nas safras 2022/2023 e 2023/2024, exceto a população de Baixa Grande/PI. Nesta etapa foram realizadas as curvas de sobrevivência e tempo de mortalidade, para comparar a suscetibilidade entre instares e entre populações.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 A CULTURA DO MILHO

A cultura do milho (*Zea mays L.*) se tornou a mais cultivada em todo o mundo (Hailu *et al.*, 2018; Niassy *et al.*, 2021). sendo uma espécie pertencente à família Gramineae/Poaceae, com grande capacidade de se adaptar aos mais variados tipos de clima e altitude favorecendo o seu cultivo em diversas partes do mundo (Barros, 2014). Os Astecas, Incas e Maias o consideravam como uma planta sagrada, sendo usado como alimento e oferenda aos deuses. O cultivo de milho no Brasil foi praticado inicialmente pelos indígenas, que usavam para a sua alimentação (Cruz, 2008).

A produção de milho foi alavancada de 20 milhões de toneladas na década de 70, para cerca de 131 milhões de toneladas na safra 2022/23, com uma área plantada de 45,7 milhões de hectares na safra 2023/24 (CONAB, 2024). Atualmente, o milho é cultivado tanto para a alimentação humana como animal, sendo que, cerca de 70% da produção mundial e de 70 a 80% da produção nacional de milho é utilizada na alimentação de aves e suínos (Cruz, 2008; CNA, 2023). Os maiores produtores mundiais de milho são os Estados Unidos, China e Brasil (CONAB, 2024).

Este aumento crescente na área plantada com a cultura do milho tem levado ao surgimento de muitas pragas, sendo que a lagarta-do-cartucho, *S. frugiperda*, atualmente é considerada como a principal praga da cultura do milho em todos os Continentes onde a cultura está presente (Goergen *et al.*, 2016). Diante do grande número de pragas na cultura do milho, criou-se variedades de milho geneticamente modificadas (GM) a fim de que se possa combater o ataque destes insetos, diminuindo o uso de produtos químicos. Para o plantio da safra 2019/2020 no Brasil, foram apresentados 196 cultivares de milho, sendo 131 cultivares transgênicos e 65 cultivares convencionais (Schuster; Rodrigues; Linares, 2022). Podem ser selecionadas populações de insetos resistentes aos ingredientes ativos, como o lambda-cialotrina, clorpirimifós, espinosade e lunofuron (Burtet *et al.*, 2017).

3.1.1 A tecnologia Bt

O *Bacillus thuringiensis* (Berliner) é uma bactéria Gram Positiva, em forma de bastonete e que vive no solo, produtora de toxinas que apresentam atividades contra protozoários, ácaros, nematoides e insetos (Baranek *et al.*, 2017). Esta bactéria foi descoberta na Alemanha em 1911, passando a ser usada como inseticida na França, em 1938 e nos EUA, na década de 1950 (Luthy *et al.*, 1982). É uma bactéria aeróbica, capaz de produzir proteínas inseticidas durante o processo de esporulação (Tetreau, 2018), como cristais parasporais (Cry) e proteínas vegetativas inseticidas (VIP) que são altamente específicos para o inseto-alvo, sendo que é uma proteína biodegradável (Baranek; Konecka; Kaznowski, 2017) e segura para humanos, plantas e outras classes de animais vertebrados (Monnerat *et al.*, 2006). Utilizando esta proteína inseticida, através do emprego da tecnologia do DNA recombinante criou-se plantas transgênicas resistentes a insetos, como a lagarta-do-cartucho. Dentre as bactérias toxinogênicas que visam o controle a insetos-praga, o *B. thuringiensis* é, sem dúvida, o mais estudado, certamente por ser o mais utilizado no controle de pragas agrícolas (Tetreau, 2018).

Esta bactéria, durante o processo de esporulação, produz uma proteína cristalina tóxica a insetos, as quais são toxinas de alta especificidade que se ligam a receptores na parede do intestino médio de insetos permitindo a oligomerização da proteína inseticida, causando a formação de poros e a consequente perfuração do intestino (Tetreau, 2018) levando os indivíduos à morte. São conhecidas como proteínas Cry ou δ-endotoxinas, estes cristais são formados de uma ou várias proteínas que são toxicas a várias ordens de insetos, como por exemplo, Coleoptera, Diptera, Hymenoptera e

Lepidoptera. Atualmente, mais de 70 grupos diferentes de toxinas Cry são conhecidas, com mais de 770 sequências gênicas descritas (Crickmore *et al.*, 2021). Há, também, secreção de proteínas inseticidas produzidas pelo *B. thuringiensis*, que inclui 4 grupos de proteína vegetativa inseticida (Vip) e um grupo de proteína inseticida secretada (Sip) (Crickmore *et al.*, 2021).

A primeira modificação genética em plantas aconteceu em 1985, em plantas de tabaco (Martineau, 2001) e a primeira variedade de milho GM aconteceu em 1996 (Storer *et al.*, 2010) para combater insetos-praga no Continente Europeu. A modificação genética da cultura do milho foi feita com a introdução de um gene oriundo da bactéria *B. Thuringiensis* (Bortolotto *et al.*, 2016). O uso de culturas Bt vem desde o ano de 1996, com o emprego de genes bacterianos em plantas de milho para expressar proteínas do *B. thuringiensis* contra insetos-praga, o que tem contribuído grandemente para a redução das aplicações de diferentes inseticidas, reduzindo danos ao meio ambiente (Bortolotto *et al.*, 2016). No entanto, alguns insetos têm conseguido formar populações resistentes à tecnologia Bt, o que tem levado ao aumento das aplicações de inseticidas contra a lagarta-do-cartucho em culturas de milho Bt (Burtet *et al.*, 2017). Para reduzir a velocidade com que essa resistência se desenvolve, uma das medidas recomendadas é o plantio de refúgio. Isso envolve criar áreas com safras não Bt ao lado das áreas com milho Bt (Fatoretto *et al.*, 2017).

Proteínas inseticidas Bt Cry1Ab, Cry1F, Cry1A.105, Cry2Ab2 e Vip3Aa20 foram inseridas em plantas de milho (milho Bt) para proteger contra uma ampla gama de pragas de lepidópteros (ISAAA, 2023). A proteína Bt Cry1Ab, nos eventos de milho MON810 ou Bt11, foi a primeira a ser implantada nas Américas contra a lagarta-do-cartucho (Fatoretto *et al.*, 2017). Subsequentemente, o evento do milho TC1507 Bt, produzindo a proteína inseticida Cry1F de *B. thuringiensis aizawai*, foi introduzido no mercado (Storer *et al.*, 2012; Fatoretto *et al.*, 2017). Quase simultaneamente, Cry2Ab2, derivado de *B. thuringiensis kurstaki* e Cry1A.105, uma quimera sintética de Cry1Ab, Cry1Ac e Cry1F, também foram introduzidas no evento transgênico MON89034 (EPA, 2012; Carrière *et al.*, 2020). Por último, a proteína Bt Vip3Aa20, derivada da cepa AB88 de *B. thuringiensis* e produzida em evento transgênico de milho MIR162, foi lançado no mercado (Fatoretto *et al.*, 2017) e tem se tornado cada vez mais adotado no Brasil desde 2018, após sua incorporação nos híbridos de milho de elite (Schuster; Rodrigues; Linares, 2022).

O uso das proteínas inseticidas Bt, sejam elas utilizadas em biopesticidas ou em cultivares transgênicas, representam uma ferramenta segura de manejo de pragas devido à sua toxicidade específica contra organismos-alvo (Raymond *et al.*, 2010; Gómez *et al.*, 2014). No entanto, a seleção da resistência nas populações de pragas é a principal ameaça à sustentabilidade das tecnologias Bt para manejo de pragas, especialmente a lagarta-do-cartucho do milho, que é inherentemente menos suscetível a muitas toxinas Bt (Adang *et al.*, 2014; Gómez *et al.*, 2014; Carrière *et al.*, 2016; Fatoretto *et al.*, 2017). A eficácia dos híbridos de milho Bt produzindo proteínas Bt Cry já haviam diminuído contra a

lagarta-do-cartucho, e a homologia estrutural destas proteínas é propício à resistência cruzada entre elas (Adang *et al.*, 2014; Bernardi *et al.*, 2015; Carrière *et al.*, 2016). Isso contrasta com Vip e Cry, que pode se ligar a locais distintos em receptores de proteínas no intestino do inseto (Adang *et al.*, 2014; Carrière *et al.*, 2016; Núñez-Ramírez *et al.*, 2020).

O Brasil é o segundo país que mais utiliza culturas expressando a tecnologia Bt no mundo (52,8 milhões de ha), com cerca de 16,6 milhões de hectares plantados com milho Bt em 2019 (Schuster; Rodrigues; Linares, 2022), alcançando percentuais totais da área plantada de 82, 79 e 62% de algodão, milho e soja, respectivamente (CIB, 2019). Nos últimos anos o uso de culturas Bt tem se tornado cada vez mais frequente, na busca por uma alternativa de combate da *S. frugiperda* (Amaral *et al.*, 2020), com o mínimo de uso de produtos químicos.

A larga utilização de culturas Bt, no Brasil, associada à baixa adoção de refúgio tem contribuído para a rápida seleção de resistência pela *S. frugiperda* às proteínas Cry1 (Santos-Amaya *et al.*, 2016; Amaral *et al.*, 2020). Os primeiros relatos de resistência da *S. frugiperda* à proteína Cry1Fa na cultura do milho Bt aconteceu em Porto Rico, no ano de 2006, tendo sido confirmado em 2010, levando à retirada das cultivares de milho expressando esta proteína do mercado porto-riquenho (Flagel *et al.*, 2018). Os insetos apresentam índices de resistência cruzada às proteínas inseticidas Bt Cry1 e Cry2 (Amaral *et al.*, 2020).

Atualmente, a nova tecnologia Vip3Aa20, também originária do *B. thuringiensis*, está se mostrando bastante eficiente em culturas de milho Bt (segunda geração) e algodão (terceira geração) (Yang *et al.*, 2019; Amaral *et al.*, 2020). Até agora, não foram registrados casos de resistência cruzada de insetos a essa proteína e às proteínas Cry usadas comercialmente (Amaral *et al.*, 2020). Como a resistência dos insetos às proteínas Cry se desenvolveu rapidamente, é crucial adotar boas práticas de manejo para evitar que o mesmo aconteça com a nova proteína (Santos-Amaya *et al.*, 2016).

No Brasil, que é o segundo maior produtor de milho Bt no mundo, a grande área ocupada por culturas Bt pode dificultar a implementação uniforme de estratégias de manejo de resistência em todas as regiões (Santos-Amaya *et al.*, 2016). No entanto, conhecer a distribuição geográfica do alelo de resistência da lagarta-do-cartucho à proteína Vip3Aa20 pode ajudar as empresas a aplicar estratégias de manejo de resistência de forma mais direcionada e eficiente (Amaral *et al.*, 2020).

Wang *et al.* (2019) destacam a importância de tecnologias como o Bt em países com clima tropical e subtropical, onde essas condições favorecem a reprodução da lagarta-do-cartucho. Esse inseto pode se reproduzir várias vezes ao ano e em diferentes tipos de plantas. No entanto, essa alta taxa de reprodução pode levar à seleção de resistência, tanto a inseticidas químicos quanto à própria tecnologia Bt. Por isso, é crucial buscar constantemente novas proteínas inseticidas, já que a lagarta-do-cartucho está sempre evoluindo para se adaptar a esses métodos de controle.

A disseminação e seleção da resistência da lagarta-do-cartucho no campo podem ser influenciadas por vários fatores, como a produção de várias gerações durante o ano (Santos-Amaya *et al.*, 2016), o comportamento migratório do inseto e práticas inadequadas de manejo ou plantio insuficiente de áreas de refúgio (Chandrasena *et al.*, 2018).

3.2 SPODOPTERA FRUGIPERDA

A lagarta-do-cartucho, *Spodoptera frugiperda* (J.E Smith) (Lepidoptera: Noctuidae), é originária de regiões tropicais e subtropicais das Américas e está presente em todo o Continente Americano (Flagel *et al.*, 2018), tendo grande importância econômica para a agricultura em todo o mundo (Kenis, 2023). *S. frugiperda* é polífaga e se alimenta de cerca de 353 espécies vegetais, incluindo o milho, milheto, arroz, sorgo, trigo, soja, algodão, alfafa, dentre muitas outras (Montezano *et al.*, 2018). Ela recebe o nome de lagarta-do-cartucho por ter preferência pelo cartucho de plantas de milho (Fernandes *et al.*, 2018). No Brasil ela se tornou uma das mais importantes pragas do milho, sendo que no estágio larval, se alimentam, especialmente, do cartucho das plantas de milho (Araujo *et al.*, 2014), podendo causar prejuízo de até 57% na lavoura (Burtet *et al.*, 2017). Mas também se alimenta das plantas de milho em todas as fases do desenvolvimento, podendo atacar inclusive o caule das plantas jovens (Mendes *et al.*, 2011).

Este inseto possui ciclo de desenvolvimento passando por ovo, lagarta, pupa e adultos (Silva *et al.*, 2017). Rosa *et al.* (2012) observaram que o período de incubação dos ovos de *S. frugiperda* na temperatura de 25 ± 1 °C, variou de 2,8 a 3,3 dias, a fase de lagarta apresentou uma variação de 10,7 a 21,7 dias. Já o estágio de pré-pupa teve uma duração de 1,89 dias. A fase pupal apresentou uma duração aproximada de 8,54 dias e a longevidade dos adultos variou em torno de 21,41 dias a uma temperatura de 25 ± 2 °C (Silva *et al.*, 2017). A duração da fase de pré-oviposição variou de 0 a 10,7 dias e a longevidade teve a sua duração variando de 21,3 a 45,7 dias (Rosa *et al.*, 2012). Considerando que este inseto possui um ciclo relativamente curto, é polífago e algumas regiões brasileiras plantam até três safras por ano (Santos-Amaya *et al.*, 2016), são condições que favorecem grandemente a reprodução da lagarta-do-cartucho durante todo o ano, podendo, uma única fêmea produzir cerca de 1.800 ovos durante a fase adulta do seu ciclo (Rosa *et al.*, 2012). As fêmeas costumam pôr os seus ovos na parte superior das folhas de milho e após a eclosão os neonatos migram para o verticilo da planta (Harrison *et al.*, 2019)

Atualmente, este inseto se tornou a principal praga do milho e do algodão nos Estados Unidos, Brasil, dentre outros países em todo o mundo (Flagel *et al.*, 2018). A partir de 2016, há relatos da presença desta praga nos campos de milho em vários países da África (Goergen *et al.*, 2016) e logo em seguida na Ásia (Rwomushana *et al.*, 2018), em 2020 chegou na Oceania (ABC News, 2020) e em 2022 chegou na Nova Zelândia e algumas ilhas Pacíficas (CABI, 2023), causando grandes perdas em

todos estes lugares. Scoton *et al.* (2020) encontraram danos significativos em plantas de milho expressando as tecnologias Herculex® e VT PRO 3®, enquanto as plantas de milho com a tecnologia Leptra® e Viptera 3® se mostraram eficientes para o controle da lagarta-do-cartucho. Danos causados por esta praga na cultura do milho podem levar a perdas de até 53% da produção desta cultura (Prasanna *et al.*, 2018).

3.2.1 Controle da *Spodoptera frugiperda* na cultura do milho

Durante décadas, o controle efetivo dessa praga foi realizado principalmente com o uso de produtos químicos sintéticos, como carbamatos, organofosforados e piretróides (Valicente; Barreto, 2003; Barcelos; Angelini, 2018). No entanto, a aplicação de inseticidas químicos contra a lagarta-do-cartucho nem sempre é eficiente. Isso pode ocorrer devido ao método de aplicação inadequado ou ao fato de que as larvas já estão em um estágio de desenvolvimento avançado, o que reduz sua suscetibilidade aos produtos (Rwomushana *et al.*, 2018). Com o desenvolvimento, após a formação do cartucho nas plantas de milho, a *S. frugiperda* se aloja no seu interior, dificultando o controle químico, que é o mais utilizado pelos produtores. Além disso, muitas vezes nas populações são selecionados indivíduos resistentes a estes produtos e, neste sentido, as tecnologias voltadas ao Bt se sobressaem, evitando que ocorra danos ao meio ambiente, à saúde humana e retardando o desenvolvimento de resistência pela praga (Yang *et al.*, 2016).

O uso de pesticidas químicos também tem o efeito colateral de eliminar os inimigos naturais das pragas, o que reduz o controle natural sobre a *S. frugiperda* (Burtet *et al.*, 2017). Em resposta a esses desafios, biopesticidas à base de microrganismos entomopatogênicos, como fungos, protozoários, nematóides e vírus, têm sido utilizados no controle da lagarta-do-cartucho. Atualmente, são conhecidas mais de 14 espécies desses microrganismos (Molina-Ochoa *et al.*, 2007). Estratégias como o uso de ervas daninhas, usados por pequenos produtores, entre as culturas devem ser mais testadas, pois podem ser muito eficientes no combate à lagarta-do-cartucho (Harrison *et al.*, 2019). Elas proporcionam o ambiente para o surgimento de ninhos e habitat para os inimigos naturais desta praga (Harrison *et al.*, 2019).

Outro método de controle é o uso de parasitóides e predadores, com mais de 150 espécies de várias ordens identificadas em todo o mundo (Hruska, 2019). Pequenos produtores também adotam uma técnica alternativa, que consiste em usar solo, areia, cinza ou serragem no verticilo das plantas de milho para desidratar as lagartas em seu primeiro estágio de desenvolvimento (Tambo *et al.*, 2020).

Atualmente, além dos métodos alternativos de controle já citados, o uso de plantas geneticamente modificadas à base de genes do *Bacillus thuringiensis*, popularmente conhecidos como plantas Bt, produzindo proteínas inseticidas Cry e/ou Vip (Angelo *et al.*, 2010). A inserção de genes Bt na cultura do milho conferiu um alto padrão de resistência das plantas a algumas espécies de

lepidópteros, como a lagarta-do-catucho (Huang *et al.*, 2002). Os pesticidas químicos e as proteínas inseticidas obtidas do *B. thuringiensis*, famílias Cry e Vip, expressadas em plantas geneticamente modificadas (Bt) têm sido largamente utilizados no controle de insetos da ordem Lepidoptera, desde 1996 (Tabashnik *et al.*, 2008). De acordo com Flagel *et al.* (2018), a introdução do uso de culturas Bt representou um avanço significativo, uma vez que as proteínas das famílias Cry1 e Cry2 se mostraram bastante eficientes contra a lagarta-do-cartucho, principalmente as proteínas Cry1FA, Cry1A.105, Cry2Ab2 e a Cry1Ab, com menor eficácia. O monitoramento da evolução de resistência de população de campo de espécies de insetos é indispensável no manejo de resistência a inseticidas (MIR) para a manutenção da tecnologia (Yang *et al.*, 2017; 2020).

Diante da ampla ocorrência de resistência de *S. frugiperda* à proteína Cry1F, a proteína Cry2A foi a que mais apresentou durabilidade antes do lançamento das plantas expressando a proteína VIP3Aa. Os últimos estudos têm mostrado que as proteínas VIP3Aa são altamente eficazes no controle a *S. frugiperda* no milho e algodão e à *Helicoverpa zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae), no algodão (Chen *et al.*, 2019). Sendo assim, as variedades de milho Bt expressando as proteínas Cry, em algumas regiões do Brasil, chegam a receber até três aplicações de inseticidas para alcançar o resultado pretendido (Fatoretto *et al.*, 2017) e, atualmente, estão cedendo espaço para as cultivares expressando as proteínas Vip3Aa20, que ainda não têm relato de insetos resistentes em campo.



REFERÊNCIAS

ABC News. Fall armyworm found in Torres Strait, Prompting Biosecurity alert amid Fears for Australian Crops. Disponível em: <https://www.abc.net.au/news/2020-02-12/worm-moth-fall-armyworm-detected-in-torres-strait/11957838>. Acesso em: 12 Fev 2020

AMARAL, F. S. A.; GUIDOLIN, A. S.; SALMERON, E.; KANNO, R. H.; PADOVEZ, F. E. O.; FATORETTO, J. C.; OMOTO, C. Geographical distribution of Vip3Aa20 resistance allele frequencies in *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) populations in Brazil. Pest Management Science, v. 76, n. 1, p. 169-178, 2020.

ANGELO, E. A.; VILAS-BÔAS, G. T.; GÓMEZ, R. J. H. *Bacillus thuringiensis*: características gerais e fermentação. Semina: Ciências Agrárias, v. 31, n. 4, p. 945-958, 2010.

ARAUJO, O. G.; MENDES, S. M.; ROSA, A. P. S. A.; MARUCCI, R. C.; SANTOS, C. D.; BARBOSOA, T. A. N.; DIAS, A. S.; CARVALHO, S. S. S. Aspectos Biológicos de Populações de *Spodoptera frugiperda* em Milho Bt e Arroz. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2014. 23 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 101).

BARANEK, J.; KONECKA, E.; KAZNOWSKI, A. Interaction between toxin crystals and vegetative insecticidal proteins of *Bacillus thuringiensis* in lepidopteran lagartae. BioControl, v. 62, n. 5, p. 649-658, 2017.

BARCELOS, P. H. S.; ANGELINI, M. R. Controle de *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) em diferentes tecnologias Bts (*Bacillus thuringienses*) na cultura do milho. Journal of Neotropical Agriculture, v. 5, n. 1, p. 35-40, 2018.

BATEMAN, M. L.; DAY, R. K.; LUKE, B.; EDGINGTON, S.; KUHLMANN, U.; COCK, M. J. W. Assessment of potential biopesticide options for managing fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) in Africa. Journal of Applied Entomology, v. 142, n. 9, p. 805 - 819, 2018.

BELAY, D.; HUCKABA, R. M.; FOSTER, J. E. Susceptibility of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), at Santa Isabel, Puerto Rico, to different insecticides. Florida Entomologist. v. 95, n. 2, p. 476-478, 2012.

BERNARDI, O.; BERNARDI, D.; HORIKOSHI, R. J.; OKUMA, D. M.; MIRALDO, L. L.; FATORETTO, J.; MEDEIROS, F. C. L.; BURD, T.; OMOTO, C. Selection and characterization of resistance to the Vip3Aa20 protein from *Bacillus thuringiensis* in *Spodoptera frugiperda*. Pest Management Science, p. 1-9, 2016a.

BERNARDI, D.; BERNARDI, O.; HORIKOSHI, R. J.; SALMERON, E.; OKUMA, D. M.; OMOTO, C. Biological activity of Bt proteins expressed in different structures of transgenic corn against *Spodoptera frugiperda*. Ciência Rural, v. 46, n. 6, p. 1019-1024, 2016b.

BERNARDI, D.; SALMERON, E.; HORIKOSHI, R. J.; BERNARDI, O.; DOURADO, P. M.; CARVALHO, R. A.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P.; OMOTO, C. Cross-resistance between Cry1 proteins in fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) may affect the durability of current pyramided bt maize hybrids in Brazil. PLoS ONE, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 1-15, 2015.

BERTA, D. C.; VIRLA, E. G.; COLOMO, M. V.; VALVERDE, E. L. Efecto en el parasitoide *Campoletis grioti* de un insecticida usado para el control de *Spodoptera frugiperda* y aportes a la bionomía del parasitoide. Revista Manejo Integrado de Plagas, v. 57, p. 65-70, 2000.



BORTOLOTTO, O. C.; DE FREITAS BUENO, A.; DE QUEIROZ, A. P.; SILVA, G. V. Desenvolvimento larval de *Spodoptera eridania* e *Spodoptera frugiperda* alimentadas com espigas de milho verde expressando proteínas Bt (Cry1F e Cry1F + Cry1A.105 + Cry2Ab2). Ciencia Rural, v. 46, n. 11, p. 1898-1901, 2016.

BURTET, L. M.; BERNARDI, O.; MELO, A. A.; PES, M. P.; STRAHL, T. T.; GUEDES, J. V. C. Managing fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), with Bt maize and insecticides in southern Brazil. Pest Management Science, v. 73, n. 12, p. 2569-2577, 2017.

CABI. *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm). CABI Compendium. 2023. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.29810>. Acesso em: 21 mar. 2024.

CHANDRASENA, D. I.; SIGNORINI, A. M.; ABRATTI, G.; STORER, N. P.; OLACIREGUI, M. L.; ALVES, A. P.; PILCHER, C. D. Characterization of field-evolved resistance to *Bacillus thuringiensis*-derived Cry1F δ-endotoxin in *Spodoptera frugiperda* populations from Argentina. Pest Management Science, v. 74, n. 3, p. 746-754, 2018.

CHEN, X.; HEAD, G. P.; PRICE, P.; KERNS, D. L.; RICE, M. E.; HUANG, F.; GILREATH, R. T.; YANG, F. Fitness costs of Vip3A resistance in *Spodoptera frugiperda* on different hosts. Pest Management Science, v. 75, n. 4, p. 1074-1080, 2019.

CIB. Impactos Econômicos e Socioambientais da Tecnologia de Resistência a Insetos no Brasil: Histórico, análise, perspectivas e desafios futuros. 2018. Disponível em: <https://cib.rds.land/impacts-of-insect-resistance-technology-br>. Acesso em: 10 nov. 2019.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Ajustes na área de milho e soja. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5531-ajustes-na-area-de-milho-e-soja-resultam-em-uma-producao-de-295-45-milhoes-de-toneladas-na-safra-20232024#:~:text=Com%20a%20atualiza%C3%A7%C3%A3o%20realizada%2C%20%C3%A1rea,ao%20semeado%20na%20safra%20passada>. Acesso em: 20 jul. 2024.

CNA. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/milho-e-um-dos-cereais-mais-nutritivos-e-versateis-do-mundo>. Acesso em: 19 de agosto de 2024.

CRICKMORE, N.; BERRY, C.; PANNEERSELVAM, S.; MISHRA, R., CONNOR, T. R., BONNING, B. C., A structure-based nomenclature for *Bacillus thuringiensis* and other bacteria-derived pesticidal proteins. Journal of Invertebrate Pathology, v. 186, p. 107438, 2021.

CRUZ, J. C.; KARAM, D.; MONTEIRO, M. A. R.; MAGALHÃES, P. C. A cultura do milho. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2008. 517 p.

FARIAS, J. R.; ANDOW, D. A.; HORIKOSHI, R. J.; SORGATTO, R. J.; FRESIA, P.; DOS 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.; FILHO, M. C. S.; SILVA, N. Adaptive potential of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) limits Bt trait durability in Brazil. Journal of Integrated Pest Management, v. 8, n. 1, p. 17, 2017.

FERNANDES, F. O.; ABREU, J. Á.; MARTINS, J. F. S.; ROSA, A. P. S. A. Desempenho de *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) em milho expressando as proteínas Cry1A.105/Cry2Ab2 no ambiente de terras baixas. Pelotas: Embrapa Clima Temperado. 2018. 20 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 287)



FLAGEL, L.; LEE, Y. W.; WANJUGI, H.; SWARUP, S.; BROWN, A.; WANG, J.; KRAFT, E.; GREENPLATE, J.; SIMMONS, J.; ADAMS, N.; WANG, Y.; MARTINELLI, S.; HAAS, J. A.; GOWDA, A.; HEAD, G. Mutational disruption of the ABCC2 gene in fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, confers resistance to the Cry1Fa and Cry1A.105 insecticidal proteins. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.

GOERGEN, G.; KUMAR, P. L.; SANKUNG, S. B.; TOGOLA, A.; TAMÒ, M. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa. *Plos One*, v. 11, n. 10, p. 1-9, 2016.

GUTIÉRREZ-MORENO, R.; MOTA-SANCHEZ, D.; BLANCO, C. A.; WHALON, M. E.; TERÁN-SANTOFIMIO, H.; RODRIGUEZ-MACIEL, J. C.; DIFONZO, C. Field-evolved resistance of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) to synthetic insecticides in Puerto Rico and Mexico. *Journal of Economic entomology*, v. 112, n. 2, p. 792-802, 2019.

HAILU, G.; NIASSY, S.; ZEYAUR, K. R.; OCHATUM, N.; SUBRAMANIAN, S. Maize-legume intercropping and push-pull for management of fall armyworm, stemborers, and striga in Uganda. *Agronomy Journal*, v. 110, n. 6, p. 2513-2522, 2018.

HARRISON, R. D.; THIERFELDER, C.; BAUDRON, F.; CHINWADA, P.; MIDEGA, C.; SCHAFFNER, U.; VAN DEN BERG, J. Agro-ecological options for fall armyworm (*Spodoptera frugiperda* JE Smith) management: Providing low-cost, smallholder friendly solutions to an invasive pest. *Journal of Environmental Management*, v. 243, p. 318-330, 2019.

HORIKOSHI, R. J.; BERNARDI, O.; GODOY, D. N.; SEMEÃO, A. A.; WILLSE, A.; CORAZZA, G. O.; RUTHES, E.; FERNANDES, D. S.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; BUENO, A. F.; OMOTO, C.; BERGER, G. U.; CORRÊA, A. S.; MARTINELLI, S.; DOURADO, P. M.; HEAD, G. Resistance status of lepidopteran soybean pests following large-scale use of MON 87701 × MON 89788 soybean in Brazil. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2021.

HRUSKA, A. J. Fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) management by smallholders. *CAB Reviews*, v. 14, p. 1-11, 2019.

HUANG, F.; BUSCHAMAN, L. L; HIGGINS, R. A.; LI, H. Survival of Kansas dipel-resistant European corn borer (Lepidoptera: Crambidae) on Bt and non-Bt corn hybrids. *Journal of Economic Entomology*, v. 95, n. 3, p. 614-621, 2002.

HUANG, F. Resistance of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*, to transgenic *Bacillus thuringiensis* Cry1F corn in the Americas: lessons and implications for Bt corn IRM in China. *Insect Science*, v. 28, n. 3, p. 574-589, 2021.

HUANG, F.; QURESHI, J. A.; MEAGHER, 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, e112958, 2014.

ISAAA. Global status of commercialized biotech/GM crops in 2019. Biotech crops drive socioeconomic development and sustainable environment in the new frontier (ISAAA Brief No. 55, ISAAA, Ithaca, NY, 2019). Disponível em: <https://www.isaaa.org/resources/publications/briefs/55/default.asp>. Acesso em: 30 jan. 2024.

KENIS, M.; BENELLI, G.; BIONDI, A.; CALATAYUD, P. A.; DAY, R.; DESNEUX, N.; HARRISON, R. D.; KRITICOS, D.; RWOMUSHANA, I.; VAN DEN BERG, J. Invasiveness, biology, ecology, and management of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. *Entomologia Generalis*, v. 43, n. 2, p. 187-241, 2023.

LI, G.; REISIG, D.; MIAO, J.; GOULD, F.; HUANG, F.; FENG, H. Frequency of Cry1F non-recessive resistance alleles in North Carolina field populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Plos One*, v. 11, n. 4, e0154492, 2016.

LUTHY, P., CORDIER, J. L. AND FISCHER, H. M. *Bacillus thuringiensis* as a bacterial insecticide: Basic considerations and application. In: KURSTAK, E. (ed). *Microbial and Viral Pesticides*. New York: Marcel Dekker Inc. 1982. p. 34-74.

MARTINEAU, B. *First fruit: The Creation of the Flavr Savr Tomato and the Birth of Biotech Foods*. New York: McGraw-Hill, 2001. 269 p.

MATYJASZCZYK, E. Problems of implementing compulsory integrated pest management. *Pest Management Science*, v. 75, n. 8, p. 2063-2067, 2019.

MENDES, S. M; BOREGAS, K. G. B.; LOPES, M. E.; WAQUIL, M. S.; WAQUIL, J. M. Respostas da lagarta-do-cartucho a milho geneticamente modificado expressando a toxina Cry 1A(b). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 46, n. 3, p. 239-244, 2011.

MOLINA-OCHOA, J.; R. LEZAMA-GUTIERREZ; M. GONZALEZ-RAMIREZ; M. LOPEZ-EDWARDS; M. A. RODRIGUEZ-VEJA; F. ARCEO-PALACIOS. Pathogens and parasitic nematodes associated with populations of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) larvae in Mexico. *Florida Entomological Society*, v. 86, p. 244-253, 2003.

MONNERAT, R.; MARTINS, E.; QUEIROZ, P.; ORDÚZ, S.; JARAMILLO, G.; BENINTENDE, G.; COZZI, J.; REAL, M. D.; MARTINEZ-RAMIREZ, A.; RAUSELL, C.; CERÓN, J.; IBARRA, J. E.; DEL RINCON-CASTRO, M. C.; ESPINOZA, A. M.; MEZA-BASSO, L.; CABRERA, L.; SÁNCHEZ, J.; SOBERON, M.; BRAVO, A. Genetic variability of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) populations from Latin America is associated with variations in susceptibility to *Bacillus thuringiensis* cry toxins. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 72, n. 11, p. 7029-7035, 2006.

MONTEZANO, D. G.; SPECHT, A.; SOSA-GÓMEZ, D. R.; ROQUE-SPECHT, V. F.; SOUSA-SILVA, J. C.; PAULA-MORAES, S. V.; PETERSON J. A.; T., E. H. Host Plants of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in the Americas. *African Entomology*, v. 26, n. 2, p. 286-300, 2018.

NIASSY, S.; AGBODZAVU, M. K.; KIMATHI, E.; MUTUNE, B.; ABDEL-RAHMAN, E. F. M.; SALIFU, D.; HAILU, G.; BELAYNEH, Y. T.; FELEGE, E.; TONNANG, H. E. Z.; EKESI, S.; SUBRAMANIAN, S. Bioecology of fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith), its management and potential patterns of seasonal spread in Africa. *Plos One*, v. 16, n. 6, e0249042, 2021.

NIU, Y.; MEAGHER, R. L.; YANG, F.; HUANG, F. Susceptibility of field populations of the fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) from Florida and Puerto Rico to Purified Cry1f protein and corn leaf tissue containing single and pyramided Bt Genes. *Florida Entomologist*, v. 96, n. 3, p. 701-713, 2013.

NIU, Y. Risk assessment of fall armyworm resistance to transgenic corn containing single or pyramided *Bacillus thuringiensis* genes. 128 p. PhD Dissertation (Master's Degree in Entomology) – Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, Louisiana, 2018.

OMOTO, C.; BERNARDI, O.; SALMERON, E.; SORGATTO, R. J.; DOURADO, P. M.; CRIVELLARI, A.; CARVALHO, R. A.; WILLSE, A.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P. Field-evolved resistance to Cry1Ab maize by *Spodoptera frugiperda* in Brazil. Pest management science, v. 72, n. 9, p. 1727-1736, 2016.

PITRE, H. N. Relationship of fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) from Florida, Honduras, Jamaica e Mississipi: susseptibility to insecticides with reference to migration. Florida Entomologist, v. 71, p. 56-61, 1988.

PRASANNA, B; HUESIN, J; EDDY, R; PESCHKE, V. Fall armyworm in Africa: a guide for integrated management. Cimmyt usaid, Mexico. Disponivel em: <https://repository.cimmyt.org/xmlui/handle/10883/19204>. Acesso em: 09 de set. 2024.

ROMEIS, J.; NARANJO, S. E.; MEISSLE, M.; SHELTON, A. M. Genetically engineered crops help support conservation biological control. Biological Control, v. 130, p. 136-154, 2019.

ROSA, A. P. A.; TRECHA, C. O.; ALVES, A. C.; GARCIA, L.; V.P. GONÇALVES. Biologia e tabela de vida de fertilidade de *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) em linhagens de milho. Arquivos do Instituto Biológico, v. 79, n. 1, p. 39-45, 2012.

RWOMUSHANA, I; BATMAN, M; BEALE, T; BESEH, P; CAMERON, K; CHILUBA, M. Fall armyworm: impacts and implication for Africa. Outlooks on Pest Management, v. 28, n. 5, p. 196-201, 2017.

SANTOS-AMAYA, O. F.; TAVARES, C. S.; RODRIGUES, J. V. C.; SANTANA, I. V.; QUEIROZ, O. S.; OLIVEIRA, E. E.; GUEDES, R. N. C.; PEREIRA, E. J. G. Strong fitness costs of insect resistance to dual-gene Bt corn are magnified on less-suitable host-crop cultivars. Agronomy, v. 12, n. 3, p. 682, 2022.

SANTOS-AMAYA, O. F.; TAVARES, C. S.; MONTEIRO, H. M.; TEIXEIRA, T. P. M.; GUEDES, R. N. C.; ALVES, A. P.; PEREIRA, E. J. G. Genetic basis of Cry1F resistance in two Brazilian populations of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda*. Crop Protection, v. 81, p. 154-162, 2016.

SANTOS-AMAYA, O. F.; RODRIGUES, J. V. C.; SOUZA, T. C.; TAVARES, C. S.; CAMPOS, S. O.; GUEDES, R. N. C.; PEREIRA, E. J. G. Resistance to dual-gene Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: Selection, inheritance, and cross-resistance to other transgenic events. Scientific Reports, v. 5, p. 1-10, 2015.

SCOTON, A. M. N.; DEGRANDE, P. E.; DA SILVA, M. B.; JACQUES, F. L.; LOURENÇAO, A. L. F.; DE SOUZA, E. P. *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) control and productive performance of Bt maize genotypes. Brazilian Journal of Agriculture, v. 95, n. 1, p. 68-82, 2020.

SILVA, D. M.; BUENO, A. F.; ANDRADE, K.; STECCA, C. DOS S.; NEVES, P. M. O. J.; DE OLIVEIRA, M. C. N. Biology and nutrition of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) fed on different food sources. Scientia Agricola, v. 74, n. 1, p. 18-31, 2017.

SOGORB, M. A.; VILANOVA, E. Enzymes involved in the detoxification of organophosphorus, carbamate and pyrethroid insecticides through hydrolysis. *Toxicology Letters*, v. 128, p. 215-228, 2002.

STORER, N. P.; BABCOCK, J. M.; SCHLENZ, M.; MEADE, T.; THOMPSON, G. D.; BING, J. W.; HUCKABA, R. M. Discovery and characterization of field resistance to Bt Maize: *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) in Puerto Rico. *Journal of Economic Entomology*, v. 103, n. 4, p. 1031-1038, 2010.

STORER, N. P.; KUBISZAK, M. E.; ED KING, J.; THOMPSON, G. D.; SANTOS, A. C. Status of resistance to Bt maize in *Spodoptera frugiperda*: Lessons from Puerto Rico. *Journal of Invertebrate Pathology*, v. 110, n. 3, p. 294-300, 2012.

TABASHNIK, B. E.; GASSMANN, A. J.; CROWDER, D. W.; CARRIÈRE, Y. Insect resistance to Bt crops: Evidence versus theory. *Nature Biotechnology*, v. 26, n. 2, p. 199-202, 2008.

TAMBO, J. A.; DAY, R. K.; LAMONTAGNE-GODWIN, J.; SILVESTRI, S.; BESEH, P. K.; OPPONG-MENSAH, B.; PHIRI, N. A.; MATIMELO, M. Tackling fall armyworm (*Spodoptera frugiperda*) outbreak in Africa: an analysis of farmers' control actions. *International Journal of Pest Management*, v. 66, p. 298-310, 2020.

TAVARES, C. S.; SANTOS-AMAYA, O. F.; OLIVEIRA, E. E.; PAULA-MORAES, S. V; JOSE PEREIRA, E. G.; JOSÉ PEREIRA, E. G. Facing Bt toxins as you grow up: The ontogeny of susceptibility to Bt corn hybrids in fall armyworm populations and the implications for resistance management. *Crop Protection*, v. 146, p. 105664, 2021

TETREAU, G. Interaction between insects, toxins, and bacteria: Have we been wrong so far? *Toxins*, v. 10, n. 7, p. 1-13, 2018.

VALICENTE, F. H.; BARRETO, M. R. *Bacillus thuringiensis* survey in Brazil: geographical distribution and insecticidal activity against *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical Entomology*, v. 32, n. 4, p. 639-644, 2003.

WAN, J.; HUANG, C.; LI, C. Y.; ZHOU, H. X.; REN, Y. L.; LI, Z.; WAN, F. Biology, invasion and management of the agricultural invader: Fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Journal of Integrative Agriculture*, v. 20, n. 3, p. 646-663, 2021.

WANG, Y.; WANG, J.; FU, X.; NAGEOTTE, J. R.; SILVERMAN, J.; BRETSNYDER, E. C.; CHEN, D.; RYDEL, T. J.; BEAN, G. J.; LI, S.; KRAFT, E.; GOWDA, A.; NANCE, A.; MOORE, R. G.; PLEAU, M. J.; MILLIGAN, J. S.; ANDERSON, H. M.; ASIIMWE, P.; EVANS, A.; MOAR, W. J.; MARTINELLI, S.; HEAD, G. P.; HAAS, J. A.; BAUM, J. A.; YANG, F.; KERNIS, D. L. *Bacillus thuringiensis* Cry1Da_7 and Cry1B.868 Protein Interactions with Novel Receptors Allow Control of Resistant Fall Armyworms, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Invertebrate Microbiology*, v. 85, n. 16, p. 1-15, 2019.

YANG, F.; GONZÁLEZ, J. C. S.; LITTLE, N.; REISIG, D.; PAYNE, G.; DOS SANTOS, R. F.; JURAT-FUENTES, J. L.; KURTZ, R.; KERNIS, D. L. First documentation of major Vip3Aa resistance alleles in field populations of *Helicoverpa zea* (Boddie) (Lepidoptera: Noctuidae) in Texas, USA. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1-8, 2020.

YANG, F.; WILLIAMS, J.; PORTER, P.; HUANG, F.; KERNIS, D. L. F2 screen for resistance to *Bacillus thuringiensis* Vip3Aa51 protein in field populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) from Texas, USA. *Crop Protection*, v. 126, p. 104915, 2019.



YANG, F.; KERNS, D. L.; HEAD, G.; BROWN, S.; HUANG, F. Susceptibility of Cry1F-maize resistant, heterozygous, and susceptible *Spodoptera frugiperda* to Bt proteins used in the transgenic cotton. *Crop Protection*, v. 98, p. 128-135, 2017.

YANG, F.; KERNS, D. L.; BROWN, S.; KURTZ, R.; DENNEHY, T.; BRAXTON, B.; HEAD, G.; HUANG, F. Performance and cross-crop resistance of Cry1F-maize selected *Spodoptera frugiperda* on transgenic Bt cotton: Implications for resistance management. *Scientific Reports*, v. 6, p. 1-7, 2016.

YANG, F.; QURESHI, J. A.; LEONARD, B. R.; HEAD, G. P.; NIU, Y.; HUANG, F. Susceptibility of Louisiana and Florida populations of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) to Pyramided Bt corn containing genuity®vt double proTM and SmartstaxTM traits. *Florida Entomologist*, v. 96, n. 3, p. 714-723, 2013.

YU, S. J. Insecticide resistance in the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith). *Pesticide Biochemistry and Physiology*, v. 39, n. 1, p. 84-91, 1991.

ZHU, C.; NIU, Y.; ZHOU, Y.; GUO, J.; HEAD, G. P.; PRICE, P. A.; WEN, X.; HUANG, F. Survival and effective dominance level of a Cry1A.105/Cry2Ab2-dual gene resistant population of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) on common pyramided Bt corn traits. *Crop Protection*, v. 115, p. 84-91, 2019.