

A TÉCNICA DO INSETO ESTÉRIL: PRINCÍPIO, ESCOLHA DA DOSE E O QUE SE PRODUZIU NO BRASIL

Luis Felipe Medeiro Alves¹;

¹Universidade de São Paulo (USP/IPEN) e Centro Universitário Internacional (Uninter), São Paulo, SP.

<http://lattes.cnpq.br/8154557253212194>

Greissi Tente Giraldi²;

²Centro Universitário Internacional (Uninter), Curitiba, PR.

<http://lattes.cnpq.br/5917356069351284>

Valter Arthur³.

³Universidade de São Paulo (USP/CENA), Piracicaba, SP.

<http://lattes.cnpq.br/4352244824716787>

RESUMO: A técnica do inseto estéril consiste em criar o inseto-praga em massa, esterilizá-lo por radiação ionizante e liberá-lo em número suficiente para que as cópulas com indivíduos selvagens não deixem descendência. Dias e Garcia (2014) registraram a carência de material em português sobre o assunto, e nos doze anos seguintes mudaram tanto os alvos quanto a tecnologia. Este capítulo reúne o princípio da técnica, os fatores que fixam a dose e o que a pesquisa brasileira produziu. A dose esterilizante compilada para 16 famílias vai de 4 a 400 Gy, uma amplitude de 100 vezes, e depende do estágio irradiado: em *Aedes aegypti* a pupa exige 4 vezes a dose do ovo, e em dois noctuídeos o adulto exige de 4 a 4,7 vezes a dose da pupa. Esterilidade total nem sempre é o ótimo, porque a dose que elimina o último ponto percentual de eclosão custa competitividade ao macho liberado. Raios X substituem o cobalto-60 com eficiência biológica relativa de 1,5 em moscamed. Ensaio de campo recentes reduziram populações-alvo de indicadores de população-alvo de 57 a 93%. As teses brasileiras cobrem moscas-das-frutas, *Aedes* e lepidópteros do algodoeiro; a lacuna está na escala e na organização em área ampla.

PALAVRAS-CHAVE: Controle autocida. Radiossensibilidade. Competitividade sexual.

THE STERILE INSECT TECHNIQUE: PRINCIPLE, DOSE SELECTION AND WHAT HAS BEEN PRODUCED IN BRAZIL

ABSTRACT: The sterile insect technique consists of mass-rearing the insect pest, sterilising it with ionising radiation and releasing it in numbers sufficient for matings with wild individuals to leave no offspring. Dias and Garcia (2014) recorded the shortage of Portuguese-language material on the subject, and over the following twelve years both the targets and the technology changed. This chapter brings together the principle of the technique, the factors that set the dose, and what Brazilian research has produced. Sterilising doses compiled

for 16 families run from 4 to 400 Gy, a 100-fold span, and depend on the stage irradiated: in *Aedes aegypti* the pupa requires 4 times the dose of the egg, and in two noctuids the adult requires 4 to 4.7 times the dose of the pupa. Full sterility is often not the optimum, because the dose that removes the last percentage point of egg hatch costs the released male its competitiveness. X-rays replace cobalt-60 with a relative biological effectiveness of 1.5 in medfly, saving 35.5% of the dose. Recent field trials reduced target populations by target-population indicators by 57 to 93%. Brazilian theses cover fruit flies, *Aedes* and cotton lepidopterans; the gap lies in rearing scale and area-wide organisation.

KEYWORDS: Autocidal control. Radiosensitivity. Mating competitiveness.

INTRODUÇÃO

A técnica do inseto estéril é um controle autocida: o próprio inseto-praga é usado contra si mesmo. Criam-se os insetos em massa, esteriliza-se o lote com radiação ionizante e liberam-se os estéreis em campo, de modo que uma fração crescente das cópulas das fêmeas selvagens não produza descendência. Knipling (1955) formalizou a aritmética da proposta, e a erradicação da mosca-da-bicheira *Cochliomyia hominivorax*, relatada no mesmo ano, mostrou que ela funcionava fora do papel (BUSHLAND; LINDQUIST; KNIPLING, 1955). O primeiro teste de campo com moscas-das-frutas, conduzido no Havaí em 1960, reduziu a população selvagem em 90% ao longo de 13 meses e não a erradicou, porque a área recebia moscas férteis das vizinhanças (DIAS; GARCIA, 2014). A limitação pertence ao método: a técnica age sobre a população inteira de uma região e falha quando aplicada a pomares isolados dentro de uma paisagem infestada.

Dias e Garcia (2014) observaram que faltava material em português de fácil obtenção por técnicos, biólogos e agrônomos. Nos doze anos seguintes a técnica se moveu bastante. Programas contra *Aedes* passaram do laboratório ao campo em vários países, apareceu a variante reforçada, em que o macho estéril também carrega larvicida, a esterilização por raios X deixou de depender do transporte de radioisótopos, e a comparação com a técnica do inseto incompatível, baseada em *Wolbachia*, entrou na pauta de decisão (SALIM et al., 2025). O Brasil tem interesse direto em cada uma dessas frentes: as moscas-das-frutas atacam cerca de 250 hospedeiros e limitam o acesso das frutas brasileiras a mercados que as tratam como pragas quarentenárias (ARAÚJO, 2000); *Aedes aegypti* é problema sanitário permanente; e o algodoeiro e o tomateiro convivem com lepidópteros para os quais o controle químico vem perdendo eficácia.

O que segue reúne o princípio da técnica, os fatores que fixam a dose esterilizante e a produção brasileira sobre o assunto, com atenção ao que ainda não foi feito. A mutagênese induzida para desenvolvimento de cultivares fica de fora, por ter literatura metodológica própria; aqui a mutação aparece apenas como o mecanismo pelo qual a radiação esteriliza e como ferramenta das linhagens de sexagem genética.

OBJETIVO

Reunir em português o princípio da técnica do inseto estéril, os fatores que determinam a dose esterilizante e o que a pesquisa brasileira produziu sobre o tema, identificando as lacunas que separam os resultados de laboratório de um programa em operação.

METODOLOGIA

O estudo tem abordagem qualitativa, natureza básica, objetivos exploratório e descritivo e, quanto aos procedimentos técnicos, caracteriza-se como pesquisa bibliográfica, na forma de revisão narrativa. Foram consultados o capítulo de referência da área (BAKRI; MEHTA; LANCE, 2005), a revisão em português sobre moscas-das-frutas (DIAS; GARCIA, 2014), teses e dissertações do repositório da Universidade de São Paulo e artigos internacionais de 2021 a 2026 sobre dose e sobre ensaios de campo.

Foram retidos os trabalhos que informam a dose absorvida junto com o estágio irradiado, ou que relatam resultado de campo com uma medida explícita de supressão. As doses estão em gray, tal como cada fonte as enuncia, sem recálculo. O Quadro 1 reproduz as faixas compiladas por família; a comparação entre estágios da Figura 1 usa duas fontes brasileiras e, por envolverem espécies, instalações e critérios de esterilidade distintos, vale como comparação de ordem de grandeza e não como medida pareada. Os dados compilados estão disponíveis com os autores mediante solicitação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O princípio e o que ele exige

A técnica só se aplica a espécies que satisfaçam um conjunto de condições, escritas junto com o método. O inseto precisa reproduzir-se por cópula, ser criável em dieta artificial a custo viável e procurar a fêmea selvagem em competição com o macho fértil. A esterilização não pode comprometer comportamento nem longevidade, a fêmea deve preferencialmente acasalar uma única vez, e o ciclo da praga deve ter uma fase de população baixa, quando a liberação rende mais. Dos machos estéreis exige-se índice mínimo de compatibilidade sexual de 0,20 com as fêmeas de campo (DIAS; GARCIA, 2014).

Disso decorrem duas consequências operacionais. Como é a razão entre estéreis e selvagens que determina a queda da fertilidade, a liberação tem de cobrir a região toda e ser sustentada por semanas, o que exige biofábrica, logística e barreiras fitossanitárias intermunicipais contra reinfestação. E a técnica rende mais onde há algum isolamento geográfico ou climático, razão pela qual o ensaio havaiano suprimiu sem erradicar.

Por que radiação ionizante, e o que ela faz

A esterilidade útil à técnica vem de mutações letais dominantes nas células germinativas. No macho, o espermatozoide continua capaz de fecundar, mas o zigoto carrega letalidade e não se desenvolve; na fêmea, o resultado é infecundidade. Nem toda esterilidade serve: aspermia e atrofia de testículos esterilizam o inseto e ao mesmo tempo

o incapacitam de competir, o que anula o propósito da liberação (DIAS; GARCIA, 2014).

Os artrópodes toleram doses que matariam um vertebrado, e a razão é estrutural. O crescimento dos imaturos é descontínuo e as células precisam dividir-se apenas uma vez por ciclo de ecdise, de modo que a fração de células em divisão num dado instante é pequena; o adulto, por sua vez, é formado sobretudo por células diferenciadas que não são repostas, e células diferenciadas resistem muito mais à radiação que células em divisão (BAKRI; MEHTA; LANCE, 2005). A escala de dose letal mediana ordena os grupos de acordo: 3 Gy para o ser humano, de 30 a 1.500 Gy para insetos e de 100 a 10.000 Gy para bactérias, protozoários e vírus.

A atmosfera durante a irradiação altera o resultado e é usada deliberadamente. Em hipóxia o dano é menor, porque os radicais formados ao longo do trajeto da radiação podem ser neutralizados por radicais de hidrogênio; na presença de oxigênio formam-se radicais peroxi, que alteram irreversivelmente as moléculas orgânicas, inclusive os cromossomos das células germinativas. Como esse efeito protetor é maior para o dano somático que para a esterilidade, irradiar em atmosfera empobrecida de oxigênio, obtida com nitrogênio ou hélio, melhora a competitividade do macho sem abrir mão da esterilidade (BAKRI; MEHTA; LANCE, 2005). O mesmo balanço entre dano oxidativo e fidelidade de reparo foi tratado quantitativamente para plantas por Alves, Alves e Arthur (2026), e é o que governa a distância entre a dose que esteriliza e a dose que incapacita.

A dose esterilizante, por família

As doses reunidas no Quadro 1 cobrem 16 famílias, 66 gêneros e 131 espécies, e vão de 4 Gy em Acrididae a 400 Gy em Arctiidae, uma amplitude de 100 vezes dentro dos artrópodes. A ordem importa para quem planeja: a média das famílias de Lepidoptera reunidas aqui é de 288 Gy contra 54 Gy nas de Diptera, um fator de 5,3, e é por isso que um programa contra lagartas trabalha em outra faixa de dose, e com outro custo de irradiação, que um programa contra moscas.

Quadro 1: Doses esterilizantes relatadas para famílias de artrópodes de interesse agropecuário ou sanitário, em gray

Família (ordem)	Alvo	Mínima	Média	Máxima	Gêneros / espécies
Acrididae (Orthoptera)	gafanhotos; a mais sensível da tabela	4	4	4	1 / 1
Aphididae (Hemiptera)	pulgões	10	10	10	2 / 2
Muscidae (Diptera)	moscas domésticas e afins	20	26	30	4 / 6
Calliphoridae (Diptera)	varejeiras, inclui a mosca-da-bicheira	20	30	40	3 / 5
Ixodidae (Acari)	carrapatos duros	31	32	33	4 / 7

Família (ordem)	Alvo	Mínima	Média	Máxima	Gêneros / espécies
Tephritidae (Diptera)	moscas-das-frutas	44	63	83	5 / 21
Culicidae (Diptera)	mosquitos, irradiados como adultos	10	54	116	3 / 15
Bruchidae (Coleoptera)	carunchos de grãos armazenados	70	80	90	3 / 5
Curculionidae (Coleoptera)	gorgulhos e bicudos	33	76	119	10 / 12
Glossinidae (Diptera)	moscas tsé-tsé	60	99	120	1 / 7
Tetranychidae (Acari)	ácaros rajados	43	153	273	2 / 4
Gelechiidae (Lepidoptera)	inclui a traça-do-tomateiro	150	200	200	3 / 3
Pyralidae (Lepidoptera)	brocas e traças	131	260	389	11 / 16
Tortricidae (Lepidoptera)	traças de fruteiras	226	278	330	8 / 12
Noctuidae (Lepidoptera)	lagartas de <i>Heliothis</i> e <i>Helicoverpa</i>	300	300	300	4 / 13
Arctiidae (Lepidoptera)	a mais resistente da tabela	400	400	400	2 / 2

Fonte: Elaborado pelos autores a partir de Bakri, Mehta e Lance (2005), Tabela 3, compilada do IDIDAS (2026).

Duas leituras precisam ser evitadas. A faixa de cada família é uma compilação de experimentos que não compartilham fonte de radiação, taxa de dose, temperatura nem critério de esterilidade, e a própria fonte alerta que os valores orientam a investigação e não especificam operação (BAKRI; MEHTA; LANCE, 2005). E famílias com muitos gêneros escondem variação interna: Tephritidae reúne 21 espécies entre 44 e 83 Gy, média 63 Gy, e Culicidae vai de 10 a 116 Gy, mais de dez vezes, em 15 espécies. A dose de trabalho tem de ser estabelecida na espécie e na linhagem que o programa cria.

Esterilidade total nem sempre é o ótimo

Conforme a dose sobe, a esterilidade aumenta e a qualidade do inseto cai. Quem recebe dose baixa não fica suficientemente estéril; quem recebe dose alta não compete, e um macho que não copula não transfere esterilidade nenhuma à população. O ponto de operação, portanto, é um compromisso, e frequentemente ele não está em 100% de esterilidade: eliminar o último ponto percentual de eclosão de ovos exige doses que reduzem substancialmente a capacidade do macho de competir com o selvagem (BAKRI; MEHTA; LANCE, 2005). A exceção é a exigência quarentenária, que pode impor esterilidade total às fêmeas liberadas.

Há ainda um erro de medida a evitar. Mutações letais se expressam em qualquer fase do desenvolvimento, e avaliar a esterilidade apenas pela eclosão dos ovos, por ser o mais cômodo, subestima o efeito real; o que descreve a esterilidade induzida é a sobrevivência de ovo a adulto (BAKRI; MEHTA; LANCE, 2005). Por isso 99% ou 100% de esterilidade medida no ovo não é uma meta desejável se custar vigor ao inseto liberado.

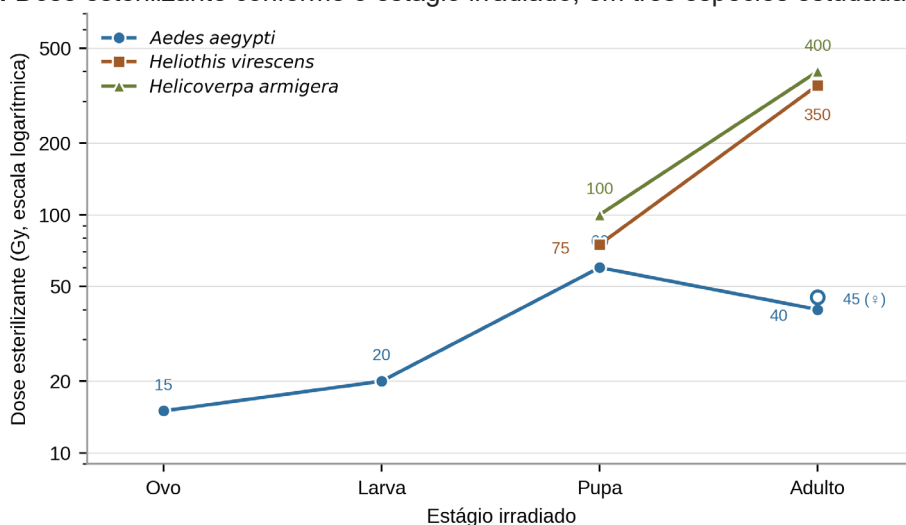
O trabalho de Sér   et al. (2026) com *Anopheles coluzzii* mostra o compromisso resolvido com dados. Pupas foram irradiadas de 40 a 120 Gy; a eclosão permaneceu intacta até 50 Gy, caiu significativamente a 60 Gy e foi suprimida por completo a 70 Gy. Os autores adotam 70 Gy porque nessa dose a inseminac  o e a emergência ficam nos níveis do controle, embora a sobrevivência caia com a dose, e registram que a competitividade em campo ainda precisa ser medida antes de a dose ser levada a um programa.

O estágio irradiado desloca a dose

Além da espécie, o estágio em que se irradia determina a dose esterilizante. Machi (2019) irradiou todas as fases do ciclo de *Aedes aegypti* numa fonte de cobalto-60 do CENA/USP, a 0,356 kGy por hora, e obteve esterilidade com 15 Gy no ovo, 20 Gy na larva e 60 Gy na pupa, com 40 Gy e 45 Gy bastando para machos e fêmeas irradiados como adultos. A pupa exigiu 4 vezes a dose do ovo, e a longevidade dos machos já caiu em pupas e adultos irradiados com 40 Gy.

Nos dois noct  deos do algodoeiro estudados por Haddad (2017) a dependência aponta para outro lado: a pupa se esteriliza com 75 Gy em *Heliothis virescens* e 100 Gy em *Helicoverpa armigera*, enquanto o adulto exige 350 Gy e 400 Gy, ou seja 4,7 e 4 vezes mais (Figura 1). A prática consagrada em moscamed segue a mesma lógica: irradiar no fim da fase de pupa produz adultos mais vigorosos, e em *Anastrepha fraterculus* a janela de 24 a 48 horas antes da emergência minimiza o dano somático sem perder a induc  o de letalidade no espermatozoide (DIAS; GARCIA, 2014).

Figura 1: Dose esterilizante conforme o estágio irradiado, em três espécies estudadas no Brasil



Fonte: Elaborada pelos autores a partir de Machi (2019) e Haddad (2017).

Raios X no lugar do cobalto

Depender de fontes de cobalto-60 e céσιο-137 é um ponto frágil de qualquer programa, porque atrasos no transporte de radioisótopos interrompem a produção. Mastrangelo (2009) validou um irradiador de raios X de baixa energia para moscamed da linhagem tsl VIENNA 8 e para uma linhagem argentina de *Anastrepha fraterculus*, irradiando pupas de 48 a 24 horas antes da emergência, e calculou a eficiência biológica relativa entre as duas radiações.

Os raios X saem na frente na indução de esterilidade. Em machos de moscamed, 82,7 Gy de raios X e 128,2 Gy de raios gama induziram os mesmos 99% de esterilidade, uma eficiência relativa de 1,5 que corresponde a poupar 35,5% da dose; em *A. fraterculus*, 41 Gy de raios X equivaleram a 62,7 Gy de gama para reduzir em 99% a fertilidade das fêmeas cruzadas com os machos tratados. Para fêmeas irradiadas de *A. fraterculus* a relação se inverte, com 99% de esterilidade entre 60 e 80 Gy e eficiência relativa em torno de 0,7. Emergência, capacidade de voo e sobrevivência não diferiram entre as duas radiações e ficaram dentro das especificações da FAO, da AIEA e do USDA, condição para que a substituição seja aceitável.

Sexagem genética: por que só os machos servem

Liberar fêmeas estéreis desperdiça produção e estraga fruta. Nos primeiros ensaios os dois sexos iam a campo, e o macho estéril tinha grande chance de copular com a fêmea estéril liberada junto, em vez da selvagem; a fêmea liberada, além disso, continuava a perfurar o fruto para ovipositar, o que abre porta a fungos e bactérias e deprecia a mercadoria mesmo sem gerar descendência (DIAS; GARCIA, 2014).

A solução veio por genética. Na década de 1980 a Agência Internacional de Energia Atômica desenvolveu uma linhagem de *Ceratitis capitata* cujas pupas fêmeas são brancas, o que permite separá-las antes da emergência; na década seguinte veio a letalidade sensível à temperatura, em que a exposição dos ovos a 34 °C por 24 horas elimina as fêmeas ainda no embrião, e hoje há cerca de 5 linhagens desse tipo em uso (DIAS; GARCIA, 2014). O mecanismo é frágil sob criação massal: as linhagens se apoiam em translocações ligadas ao cromossomo sexual, e a ocorrência de permuta no macho recompõe genótipos recombinantes que destroem a sexagem, tanto mais rápido quanto maior a frequência de permuta. Incluir inversões cromossômicas na linhagem elimina seletivamente os recombinantes e preserva o mecanismo (CÁCERES BARRIOS, 1998).

Os alvos, e o que existe no Brasil

A produção brasileira sobre a técnica se concentra em moscas-das-frutas e vem, em boa medida, de um mesmo grupo de pesquisa (Quadro 2). Ela cobre a esterilização em si, desde o uso de gama com gases inertes (ALMEIDA, 1984), a sexagem genética (CÁCERES BARRIOS, 1998), a modelagem e o planejamento de um programa nacional contra a mosca-do-mediterrâneo (ARAÚJO, 2000), a linha de base populacional que antecede qualquer

liberação (BLUMER, 2001), a troca do cobalto por raios X (MASTRANGELO, 2009) e o comportamento que decide a eficiência da liberação (ANDRADE, 2009). Fora das moscas, há *Aedes aegypti* (MACHI, 2019) e os lepidópteros do algodoeiro (HADDAD, 2017).

Quadro 2: Teses e dissertações brasileiras sobre a técnica do inseto estéril

Trabalho	Alvo	Contribuição	Instituição
Almeida (1984)	Moscamed	Gama com gases inertes	ESALQ/USP
Cáceres Barrios (1998)	Moscamed	Sexagem genética por mutação induzida	CENA/USP
Araújo (2000)	Moscamed	Modelo e etapas de um programa nacional	CENA/USP
Blumer (2001)	Moscas-das-frutas	Linha de base populacional e hospedeiros	CENA/USP
Mastrangelo (2009)	Moscamed e <i>A. fraterculus</i>	Raios X no lugar do cobalto-60	CENA/USP
Andrade (2009)	Moscamed	Recópula da fêmea selvagem	ESALQ/USP
Haddad (2017)	<i>H. virescens</i> e <i>H. armigera</i>	Dose por estágio, algodoeiro	CENA/USP
Machi (2019)	<i>Aedes aegypti</i>	Dose por estágio do ciclo	IPEN/USP

Fonte: Elaborado pelos autores a partir do repositório da Universidade de São Paulo (2026).

O levantamento de Blumer (2001) mostra o tamanho do trabalho preliminar: em pouco mais de um ano de armadilhamento em Piracicaba foram coletados 79.428 exemplares, 51,3% de *Anastrepha* spp. e 48,7% de *C. capitata*, com frutos de 55 espécies vegetais examinados, 35 deles hospedeiros de *Anastrepha*, e o café em cereja como principal hospedeiro da mosca-do-mediterrâneo. Sem esse mapa não há como dimensionar a liberação nem escolher a época.

Nos alvos sanitários e nos de outras culturas, a evidência de campo recente vem de fora e é consistente. Contra *Aedes albopictus*, liberações reforçadas na Grécia reduziram a população adulta em 85 a 93% em relação ao sítio-controle, com razão de 15:1 entre machos estéreis e selvagens (GIATROPOULOS et al., 2025), e um ensaio urbano na Suíça obteve 57% menos ovos e 66% menos fêmeas adultas na área tratada (PARRONDO MONTON et al., 2026). Em *Drosophila suzukii*, liberações ao longo da safra em framboesa comercial reduziram em até 89% as fêmeas selvagens e em até 80% as larvas por fruto colhido, e o refugo de fruta não comercializável caiu 40,3%, 26,8% e 58,4% nas parcelas de início, meio e fim de colheita (HEMER et al., 2025). Esse último conjunto é o que mais se aproxima de um argumento econômico, porque mede perda evitada, além da densidade de praga.

Em lepidópteros a variante usada costuma ser a esterilidade herdada, em que se aplica dose que não esteriliza o macho por completo e a letalidade se expressa na geração seguinte, o que preserva competitividade (WEI et al., 2025). Para a traça-do-tomateiro *Tuta absoluta*, praga também estabelecida no Brasil, Ashouri (2025) irradiou pupas de 100 a 300 Gy e indica 250 Gy para programas de inseto estéril e de esterilidade herdada no Irã: nessa dose as fêmeas ficam completamente estéreis e os machos, semiestéreis, que é a

condição de que a esterilidade herdada depende. O macho só se esteriliza por completo a 300 Gy, acima da faixa do Quadro 1 para a família.

O que limita a técnica

A biologia reprodutiva da praga impõe os limites mais duros. Se a fêmea selvagem recopula após ter sido inseminada por um macho estéril, parte do efeito se perde, e o mesmo vale para a fertilidade residual do macho irradiado: Dumont e Oliva (2024) mostram que os dois fatores juntos deslocam a razão de liberação necessária em *Ceratitis capitata*. A poliandria muda o cálculo pelo mesmo motivo, com efeito favorável ou adverso conforme a fêmea use o esperma estéril ou o fértil (COURTOIS et al., 2026). Andrade (2009) atacou essa questão em moscamed no Brasil.

A resistência, que é o que costuma inutilizar inseticidas, opera de forma diferente aqui. A forma plausível de resistência é a evolução de fêmeas capazes de discriminar e recusar o macho estéril. Bull e Gomulkiewicz (2022) mostram que a seleção favorece essa discriminação, mas que ela em geral é lenta demais para deter o colapso da população quando se libera um número constante de estéreis, porque a vantagem dos machos estéreis em dominar as cópulas cresce à medida que a população selvagem diminui e atinge igualmente as fêmeas discriminantes. O resultado vale para o regime de liberação constante que o modelo supõe.

Há ainda um obstáculo taxonômico específico da região. *Anastrepha fraterculus* comporta-se como um complexo de espécies crípticas, com divergências morfológicas, moleculares e bioquímicas entre populações e isolamento reprodutivo entre parte delas, de modo que uma linhagem criada para uma região pode não ser sexualmente compatível com a população de outra (DIAS; GARCIA, 2014). Um programa brasileiro contra essa espécie precisa verificar compatibilidade população por população antes de escolher a linhagem de criação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A técnica está bem estabelecida no princípio e é exigente na execução. A dose esterilizante varia cem vezes entre famílias de artrópodes, muda por um fator de quatro ou cinco conforme o estágio em que se irradia, e o ponto de operação é um compromisso entre esterilidade e competitividade que raramente coincide com esterilidade total. Atmosfera, taxa de dose e temperatura deslocam esse compromisso, e a troca do cobalto-60 por raios X o desloca a favor. A sexagem genética deixou de ser refinamento e passou a ser condição.

A pesquisa brasileira cobriu esse terreno para moscas-das-frutas e produziu determinações de dose para *Aedes aegypti* e para dois noctuídeos do algodoeiro. Para transformar esse acervo em programa faltam escala de criação, organização em área ampla, barreiras contra reinfestação e, para *Anastrepha fraterculus*, verificação de compatibilidade sexual entre populações. Este capítulo não fornece o custo por hectare de uma cultura agrícola em condições brasileiras, que é o número de que uma decisão de investimento

precisaria, e essa é a lacuna mais concreta a fechar.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. S. P. de. Uso da radiação gama e gases inertes na esterilização de *Ceratitis capitata* (Wied., 1824) (Diptera: Tephritidae) com vistas à aplicação da técnica do inseto estéril. 1984. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984. DOI: 10.11606/d.11.1984.tde-20240301-150603.
- ALVES, L. F. M.; ALVES, L. S. M.; ARTHUR, V. Redox balance and repair fidelity govern the continuum of radiation effects in plants. *Communication in Biomathematical Sciences*, v. 9, n. 1, p. 122-136, 2026. DOI: 10.5614/cbms.2026.9.1.8.
- ANDRADE, R. de. Influência da recópula de fêmeas selvagens de *Ceratitis capitata* (Wied., 1824) (Diptera: Tephritidae) na eficiência da técnica do inseto estéril. 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. DOI: 10.11606/d.11.2009.tde-11022009-091301.
- ARAÚJO, K. R. P. de. Modelo matemático para simular a aplicação da técnica do inseto estéril e etapas de implementação de um programa de controle da mosca do mediterrâneo no Brasil. 2000. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000. DOI: 10.11606/t.64.2000.tde-20260514-154616.
- ASHOURI, S. Optimization of Co60 gamma radiation dose for applying sterile insect technique and inherited sterility on *Tuta absoluta* (Meyrick). *Scientific Reports*, v. 16, n. 1, 2474, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-32383-2.
- BAKRI, A.; MEHTA, K.; LANCE, D. R. Sterilizing insects with ionizing radiation. In: DYCK, V. A.; HENDRICH, J.; ROBINSON, A. S. (org.). *Sterile insect technique: principles and practice in area-wide integrated pest management*. Dordrecht: Springer, 2005. p. 233-268. DOI: 10.1007/1-4020-4051-2_9.
- BLUMER, L. Levantamento, flutuação e estimativa populacional de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) em área experimental para aplicação da técnica do inseto estéril. 2001. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. DOI: 10.11606/t.64.2001.tde-20260514-154626.
- BULL, J. J.; GOMULKIEWICZ, R. The sterile insect technique is protected from evolution of mate discrimination. *PeerJ*, v. 10, e13301, 2022. DOI: 10.7717/peerj.13301.
- BUSHLAND, R. C.; LINDQUIST, A. W.; KNIPLING, E. F. Eradication of screw-worms through release of sterilized males. *Science*, v. 122, n. 3163, p. 287-288, 1955. DOI: 10.1126/science.122.3163.287.
- CÁCERES BARRIOS, C. E. Indução de mutações em *Ceratitis capitata* (Wiedemann, 1824) (Diptera: Tephritidae) e suas possíveis utilizações no melhoramento da eficiência da técnica do inseto estéril. 1998. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998. DOI: 10.11606/t.64.1998.tde-20260514-154513.

COURTOIS, M. A. et al. Polyandry: a threat or an opportunity for the sterile insect technique? *PLOS Computational Biology*, v. 22, n. 4, e1014212, 2026. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1014212.

DIAS, N. P.; GARCIA, F. R. M. Fundamentos da técnica do inseto estéril (TIE) para o controle de moscas-das-frutas (Diptera, Tephritidae). *Biológico*, São Paulo, v. 76, n. 1, p. 58-62, 2014.

DUMONT, Y.; OLIVA, C. P. On the impact of re-mating and residual fertility on the sterile insect technique efficacy: case study with the medfly, *Ceratitis capitata*. *PLOS Computational Biology*, v. 20, n. 5, e1012052, 2024. DOI: 10.1371/journal.pcbi.1012052.

GIATROPOULOS, A. et al. Suppression of the Asian tiger mosquito (*Aedes albopictus*) populations using the boosted sterile insect technique in Greece. *Scientific Reports*, v. 15, n. 1, 38738, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-22454-9.

HADDAD, G. Q. Perspectiva de utilização da técnica do inseto estéril para lagarta da maçã *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae) e lagarta do velho mundo *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) na cultura do algodoeiro como um método alternativo de controle. 2017. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017. DOI: 10.11606/t.64.2017.tde-19052017-153520.

HEMER, S. et al. Suppression of spotted wing drosophila, *Drosophila suzukii* (Matsumura), in raspberry using the sterile insect technique. *Insects*, v. 16, n. 8, 791, 2025. DOI: 10.3390/insects16080791.

KNIPLING, E. F. Possibilities of insect control or eradication through the use of sexually sterile males. *Journal of Economic Entomology*, v. 48, n. 4, p. 459-462, 1955. DOI: 10.1093/jee/48.4.459.

MACHI, A. R. Efeitos da radiação ionizante nas fases do ciclo evolutivo de *Aedes aegypti* L. visando o seu controle através da técnica do inseto estéril. 2019. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. DOI: 10.11606/t.85.2019.tde-20052019-085251.

MASTRANGELO, T. de A. Esterilização de moscas-das-frutas (Diptera: Tephritidae) com raios-X para programas de técnica do inseto estéril. 2009. Dissertação (Mestrado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009. DOI: 10.11606/d.64.2009.tde-09102009-161657.

PARRONDO MONTON, D. et al. Assessing the sterile insect technique in small, non-isolated urban areas: a field trial against *Aedes albopictus* in southern Switzerland. *Insects*, v. 17, n. 8, 793, 2026. DOI: 10.3390/insects17080793.

SALIM, K. U. et al. Sterile insect technique and incompatible insect technique, emerging alternatives to insecticides for mosquito control. *Journal of Integrated Pest Management*, v. 16, n. 1, 10, 2025. DOI: 10.1093/jipm/pmaf009.

SÉRÉ, B. V. et al. Optimization of the irradiation dose for *Anopheles coluzzii* for implementation of the sterile insect technique. *Parasites & Vectors*, v. 19, n. 1, 261, 2026. DOI: 10.1186/s13071-026-07396-z.

WEI, Z. et al. A review of sterile insect technique in Lepidoptera pest management: advances and applications. *Entomologia Generalis*, v. 45, n. 5, p. 1241-1258, 2025. DOI: 10.1127/entomologia/3696.