

Perspectivas científicas del agro

Serie de documentos de trabajo

# Escaneo científico sobre Técnica del Insecto Estéril (TIE)

Leidy Johanna Cárdenas Solano  
Carlos Alberto Contreras Pedraza





## Escaneo científico sobre Técnica del Insecto Estéril (TIE)

### **Autores**

Leidy Johanna Cárdenas Solano  
Carlos Alberto Contreras Pedraza

Mosquera, Octubre 2022

La elaboración de este documento se deriva de las acciones de monitoreo y seguimiento de información científica, desarrollados por el Departamento de Inteligencia Científica y Tecnológica de la Dirección de Investigación y Desarrollo de Agrosavia.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA)  
 Sede Central. Kilómetro 14 vía Mosquera-Bogotá, Mosquera, Cundinamarca. Código postal 250047,  
 Colombia.

**Citación sugerida:** Cárdenas Solano, L. J. & Contreras Pedraza, C. A. (2022). *Escaneo científico sobre Técnica del Insecto Estéril (TIE)*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA).

DOI: 10.21930/agrosavia.escaneocientifico.2022.5

Línea de atención al cliente: 018000121515

atencionalcliente@agrosavia.co

<http://www.agrosavia.co>



[https://co.creativecommons.org/?page\\_id=13](https://co.creativecommons.org/?page_id=13)

**Cláusula de responsabilidad:** AGROSAVIA no es responsable de las opiniones e información recogidas en el presente texto. Los autores asumen de manera exclusiva y plena toda responsabilidad sobre su contenido, ya sea este propio o de terceros, y declaran, en este último supuesto, que cuentan con la debida autorización de terceros para su publicación; igualmente, declaran que no existe conflicto de interés alguno en relación con los resultados de la investigación propiedad de tales terceros. En consecuencia, los autores serán responsables civil, administrativa o penalmente, frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros relativa a los derechos de autor u otros derechos que se hubieran vulnerado como resultado de su contribución.

## Tabla de Contenido

1	Introducción.....	7
2	Diseño metodológico.....	8
3	Resultados .....	8
3.1	Dinámica de publicaciones.....	8
3.2	Indicadores de producción científica .....	9
3.3	Principales fuentes de difusión y consulta.....	10
3.4	Tópicos tendenciales.....	13
3.5	Referentes en investigación .....	14
3.6	Mapa de distribución temática.....	15
3.7	Red de Coocurrencia de tópicos .....	16
3.8	Resultados sobre generalidades de la Técnica del Insecto Estéril (TIE).....	18
3.9	Principios y prácticas de la TIE .....	19
	Valor de lograr una comprensión conjunta.....	19
	Sistema de apareamiento.....	20
	Densidad-Dependencia en la regulación de la población.....	21
	Tasas de inundación, tasas de liberación y zonas de amortiguamiento.....	21
	Agregación de población.....	23
	Efectos de la depredación sobre la eficiencia de la TIE .....	23
	TIE con aplicación de insecticida .....	24
	TIE con trampas de feromonas para la aniquilación de machos .....	24
	TIE con Liberación de Parasitoides.....	25
	TIE con medidas sanitarias y trampas de oviposición.....	26
	Optimización del Programa de Liberación de Insectos Estériles.....	26
3.10	Conceptos erróneos de la TIE.....	26
	Especies de hembras monógamas .....	26
	¿Deben los insectos liberados ser completamente estériles?.....	27
	¿La aplicación TIE requiere poblaciones aisladas o un enfoque de área amplia? ....	27
	¿Es la erradicación el único objetivo al utilizar la TIE?.....	28
	¿Es la TIE una tecnología independiente o parte de una estrategia de MIP para toda el área? .....	28
3.11	Limitaciones de la TIE .....	28
	Asociado al costo .....	28

Parámetros adversos de población, ecológicos y de comportamiento .....	29
¿Resistencia a la TIE? .....	29
La escasa competitividad de los insectos liberados .....	30
3.12 Principios de la técnica del insecto estéril .....	30
3.13 Elementos básicos de la TIE .....	31
¿Cómo los machos estériles reprimen las poblaciones? .....	31
Diseño de sistemas de manejos de plagas .....	31
Lecciones aprendidas.....	31
Escape y preocupaciones medioambientales .....	32
Suministro de insectos estériles .....	33
3.14 Implicaciones para la elección del procesamiento de insectos .....	34
3.15 Producción Comercial y Liberación de Insectos Estériles .....	35
Envío de insectos estériles .....	36
Tiempo y calidad .....	36
Envío de huevos.....	37
Costos de envío .....	37
3.16 Instalaciones de emergencia y liberación.....	38
Ubicación y diseño .....	38
Equipos de Control Ambiental .....	39
3.17 Aparición y recolección de insectos estériles .....	39
3.18 Liberación de insectos estériles .....	41

## Listado de Figuras

Figura 1. Dinámica de publicaciones.....	8
Figura 2. Dinámica de publicaciones.....	14
Figura 3. Referentes en investigación, autores, instituciones, países y fuentes de consulta .....	15
Figura 4. Mapa temático de distribución de tópicos.....	16
Figura 5. Red de coocurrencia de tópicos clave.....	17
Figura 6. Red de coocurrencia de tópicos – línea temporal .....	18

## Listado de Tablas

Tabla 1. Indicadores bibliométricos de la producción científica.....	9
Tabla 2. Principales países e instituciones internacionales.....	9
Tabla 3. Principales fuentes de la producción científica asociada a TIE .....	10
Tabla 4. Cinco Publicaciones más citadas .....	11
Tabla 5. Cinco Publicaciones más recientes .....	12
Tabla 7. Implicaciones para la elección del procesamiento de insectos.....	34
Tabla 8. Tipos de sistema de recolección de insectos estériles .....	40
Tabla 9. Tipos de liberación de insectos estériles .....	42

## **Autores**

### **Leidy Johanna Cardenas Solano, M.Sc.**

Orcid: [0000-0001-5471-7160](https://orcid.org/0000-0001-5471-7160)

Ingeniera Industrial, MSc en Ingeniería Industrial enfocada en la gestión de la tecnología y la innovación, certificada como Ciudadana de Datos por Alianza Caoba y Científica de datos certificada por MinTIC y Correlation One, con conocimientos en ISO 27001:2013. Investigador Junior reconocido por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia y Analista del Departamento de Inteligencia y Divulgación Científica de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria AGROSAVIA. Formación en Platzi en Transformación Digital y más de 10 años de experiencia en valoración financiera de tecnologías, transferencia tecnológica y formulación de proyectos de I+D+i para el SGR, Minciencias, y CYTED. Docente universitaria, experiencia en la creación del Centro de Investigación en Agua CENIAGUA y formulación de proyectos para la consecución de más de 13 mil millones que se ejecutan a través de proyectos financiados con beneficios tributarios. Las principales áreas de investigación comprenden la gestión del conocimiento, la gestión de la innovación, la gestión de la tecnología, la inteligencia competitiva, la vigilancia tecnológica, la cienciometría, el análisis de las cadenas de valor de la agricultura, la hoja de ruta tecnológica, el benchmarking, y la prospectiva tecnológica.

### **Carlos Alberto Contreras Pedraza, M.Sc.**

Orcid: [0000-0001-7138-2147](https://orcid.org/0000-0001-7138-2147)

Profesional en Ingeniería Industrial, Magíster en Ingeniería Agrícola y estudios en Magister en Ingeniera Industrial de la Universidad Nacional de Colombia. Investigador Master Asociado de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y Coordinador de Inteligencia Científica de la misma. Experiencia en investigación y ejecución de proyectos en el área de gestión tecnológica, gestión de conocimiento y direccionamiento estratégico de sectores productivos. Ha desarrollado proyectos con la Universidad Nacional de Colombia, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, AGROSAVIA, La Corporación de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo de la Industria Naval Marítima y Fluvial - COTECMAR, Cámara de Comercio de Cartagena, Universidad Tecnológica de Bolívar, entre otras. Conocimiento y habilidad en el desarrollo de ejercicios de vigilancia tecnológica y comercial, benchmarking, diagnóstico tecnológico, prospectiva, desarrollo de indicadores en CTI, entre otros. Experiencia en estudios estratégicos para cadenas productivas agroindustriales, manejo de bases de datos de información científica y comercial, elaboración y actualización de indicadores de CTI para el sector agropecuario, al igual herramientas informáticas básicas y especializadas en el campo de la vigilancia tecnológica y comercial.

## 1 Introducción

La técnica del insecto estéril (TIE) ha emergido como una herramienta fundamental en el control de plagas, especialmente en la gestión de la mosca de la fruta del Mediterráneo (*Ceratitis capitata*), una de las plagas más devastadoras para la agricultura a nivel global. La TIE consiste en la cría y liberación de grandes cantidades de insectos estériles, que compiten con las poblaciones silvestres, reduciendo gradualmente la capacidad reproductiva de la plaga y, por ende, su densidad poblacional.

El análisis de la ecuación de búsqueda TITLE-ABS-KEY (("Mediterranean fruit fly" OR "Ceratitis capitata" OR wiedemann OR "Diptera W/2 Tephritidae") AND ("Sterile W/2 Insect Techn\*" OR sit)) revela una vasta colección de investigaciones enfocadas en la aplicación de la TIE en *Ceratitis capitata* según la base de consulta de Scopus®.

Los estudios han documentado numerosos aspectos de la TIE, desde los métodos de irradiación y cría masiva hasta las estrategias de liberación y monitoreo en campo. Además, se han explorado las interacciones entre la TIE y otros métodos de control integrado de plagas (IPM), destacando su papel en la sostenibilidad agrícola.

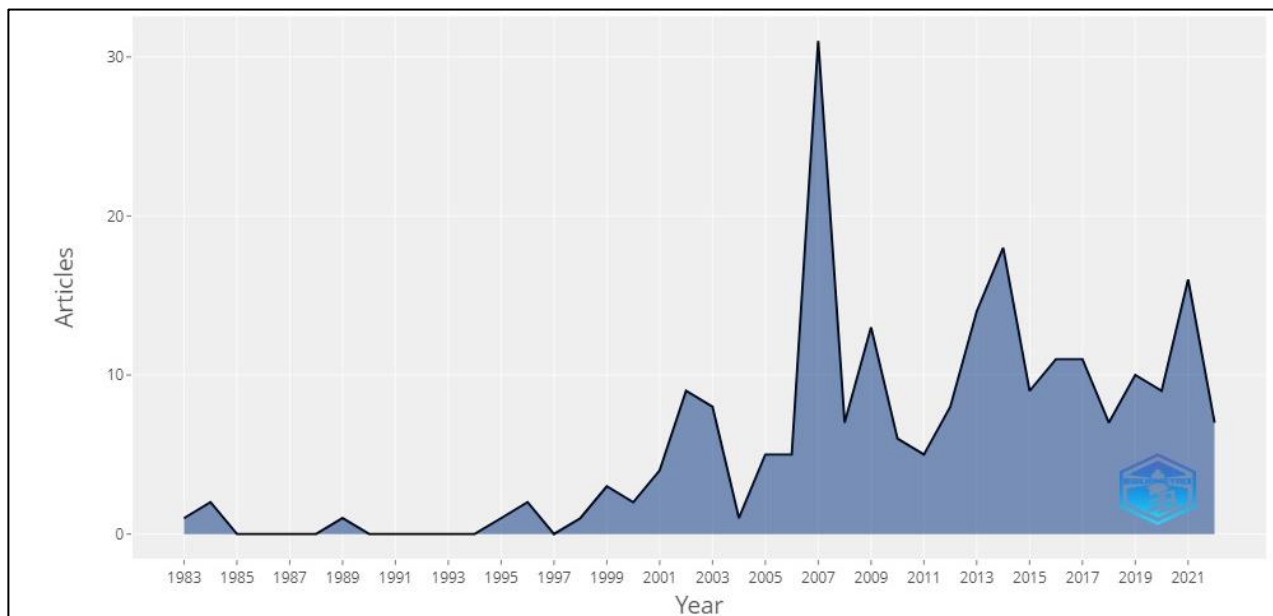
En este contexto, el objetivo de este escaneo científico es proporcionar una visión comprensiva de los avances, desafíos y perspectivas futuras de la TIE en el manejo de la mosca de la fruta del Mediterráneo, subrayando su relevancia como componente clave en los programas de control de plagas a nivel mundial.

## 2 Diseño metodológico

Utilizando la siguiente ecuación como estrategia de búsqueda: TITLE-ABS-KEY ( ( "Mediterranean fruit fly" OR "Ceratitis capitata" OR wiedemann OR "Diptera W/2 Tephritidae" ) AND ( "Sterile W/2 Insect Techn\*" OR sit ) ).

## 3 Resultados

### 3.1 Dinámica de publicaciones



#### Figura 1. Dinámica de publicaciones

Fuente. Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®

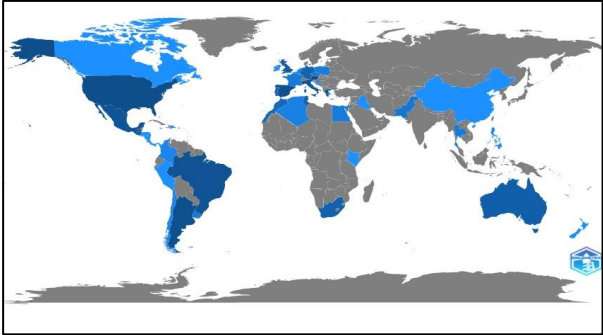
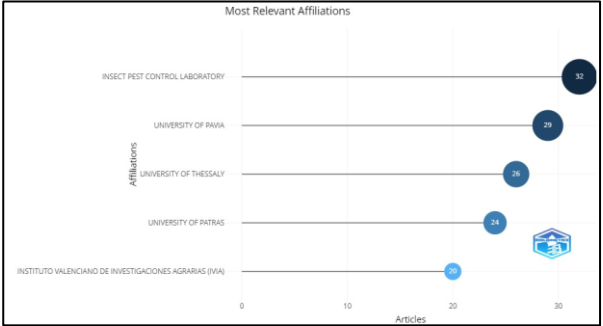
### 3.2 Indicadores de producción científica

**Tabla 1. Indicadores bibliométricos de la producción científica**

Indicadores de Bibliometrix
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Número de publicaciones: 227</li> <li>• Citaciones promedio por artículo: 26,3</li> <li>• Citaciones promedio por artículo al año: 2,163</li> <li>• Colaboración Internacional: 3,47%</li> <li>• Investigadores: 744</li> <li>• Documentos por autor: 0,305</li> <li>• Autores por documento: 3,28</li> </ul>

Fuente: Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®

**Tabla 2. Principales países e instituciones internacionales**

Países líderes	Top 5 instituciones internacionales
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Austria, 145 publicaciones</li> <li>• Estados Unidos, 140 publicaciones</li> <li>• Argentina, 126 publicaciones</li> <li>• España, 118 publicaciones</li> <li>• Brasil, 97 publicaciones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insect Pest Control Laboratory, 32 publicaciones</li> <li>• University of Pavia, 29 publicaciones</li> <li>• University of Thessaly, 26 publicaciones</li> <li>• University of Patras, 24 publicaciones</li> <li>• Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA), 20 publicaciones</li> </ul>
 <p>Fuente: Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®</p>	 <p>Fuente: Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®</p>

### 3.3 Principales fuentes de difusión y consulta

**Tabla 3. Principales fuentes de la producción científica asociada a TIE**

Principales fuentes de difusión y consulta	Breve descripción	Número de publicaciones
Florida Entomologist	The Florida Entomologist publica artículos de acceso abierto que cubren diversos aspectos de la ciencia entomológica y acarológica básica y aplicada relevantes para la agricultura, los entornos urbanos y los recursos naturales de Florida. La revista incluye investigaciones del sureste de Estados Unidos, la región del Caribe y México, ya que estas áreas son fuentes importantes de especies invasoras en Florida. Este enfoque garantiza que la revista aborde cuestiones críticas en el manejo de plagas, la conservación de la biodiversidad y la salud de los ecosistemas en estas regiones.	27 publicaciones
Entomologia Experimentalis et Applicata	Con un enfoque amplio en la entomología, la revista cubre diversos temas que van desde las interacciones fisiológicas, ecológicas, evolutivas y morfológicas entre los insectos y sus plantas hospederas, hasta sus relaciones con parasitoides, depredadores y patógenos.	25 publicaciones
Journal of Applied Entomology	Esta revista publica investigaciones en entomología aplicada desde hace más de 100 años. Además, el alcance esta revista ha crecido con el tiempo para incluir nuevas disciplinas, como los ácaros y arañas en los ecosistemas terrestres. En 2006, este journal fue adoptado	22 publicaciones

Principales fuentes de difusión y consulta	Breve descripción	Número de publicaciones
	como publicación oficial de la Sociedad Alemana de Entomología General y Aplicada.	
Journal of Economic Entomology	Es la revista más citada en el campo de la entomología. La revista publica artículos sobre la importancia económica de los insectos y otros artrópodos, abordando diversos aspectos relacionados con su interacción con plantas, patógenos, sistemas de control, y su impacto en la agricultura, la salud pública y el medio ambiente. Cada sección de la revista se centra en un área específica de estudio, desde la apicultura hasta la resistencia a insecticidas, pasando por la ecología forestal y la entomología médica.	16 publicaciones
Area-Wide Control of Insect Pests: From Research to Field Implementation	Es un volumen que recopila una amplia gama de información sobre la gestión de plagas en la protección de los cultivos, lo que lo convierte en una referencia valiosa para la comunidad global de manejo integrado de plagas.	12 publicaciones

Fuente: Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022.

**Tabla 4. Cinco Publicaciones más citadas**

Autores	Título	Número de citas	DOI
HENDRICHS J, 2003, FLA ENTOMOL	Medfly areawide sterile insect technique programmes for prevention, suppression or eradication: The importance of mating behavior studies.	269	10.1653/0015-4040(2002)085[0001:masitp]2.0.co;2

Autores	Título	Número de citas	DOI
HENDRICHS J, 1995, J APPL ENTOMOL	Increased effectiveness and applicability of the sterile insect technique through male-only releases for control of Mediterranean fruit flies during fruiting seasons.	201	10.1111/j.1439-0418.1995.tb01303.x
KRAFSUR ES, 1998, J AGRIC URBAN ENTOMOL	Sterile insect technique for suppressing and eradicating insect population: 55 years and counting.	180	
FRANZ G, 2005, STERILE INSECT TECH: PRINCIPLES AND PRACT IN AREA-WIDE INTGD PEST MANAGE	Genetic Sexing Strains in Mediterranean Fruit Fly, an Example for Other Species Amenable to Large-Scale Rearing for the Sterile Insect Technique.	176	10.1007/1-4020-4051-2_16
AMI EB, 2010, ISME J	Manipulation of the microbiota of mass-reared Mediterranean fruit flies <i>Ceratitis capitata</i> (Diptera: Tephritidae) improves sterile male sexual performance.	160	10.1038/ismej.2009.82

Fuente: Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022.

**Tabla 5. Cinco Publicaciones más recientes**

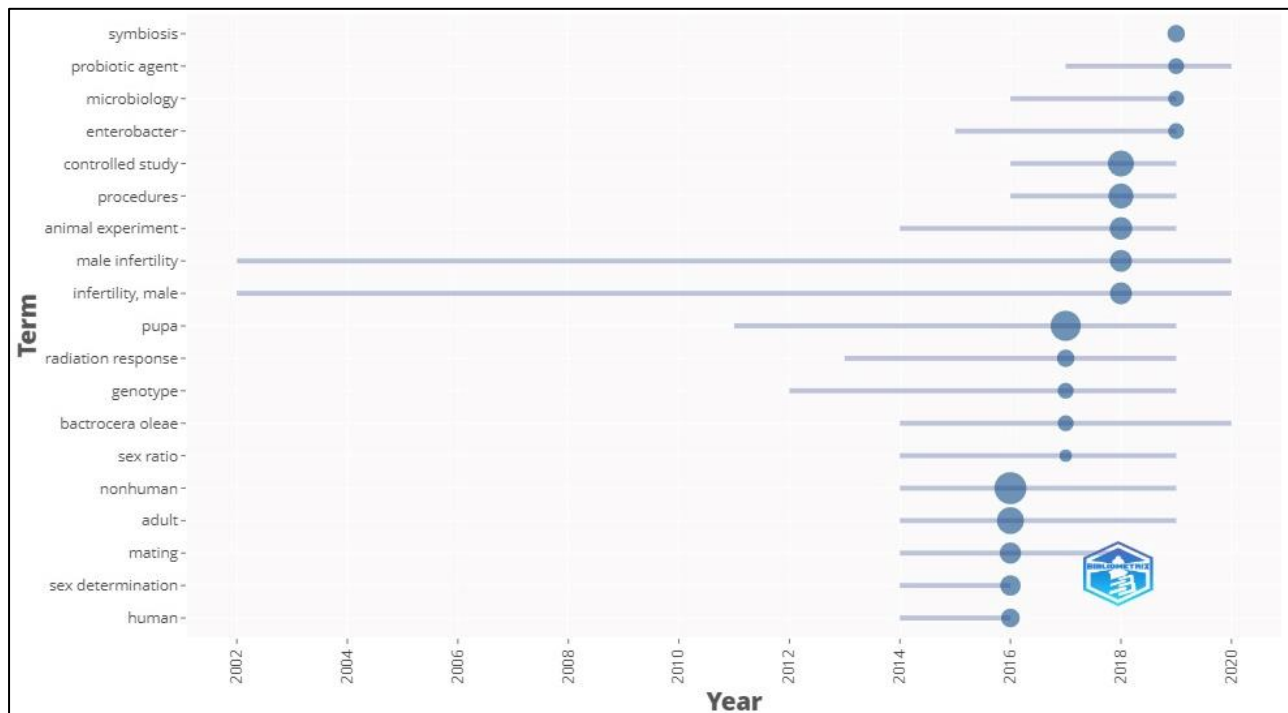
Autores	Título	Número de citas	DOI
González-López, G.I., Valenzuela-Carrasco, G., Toledo-Mesa, E.,	Determination of the Physiological Age in Two Tephritid Fruit Fly Species Using Artificial Intelligence	2022	Journal of economic entomology 115(5), pp. 1513-1520

Autores	Título	Número de citas	DOI
(…), Tapia-McClung, H., Pérez-Staples, D.			
Kyritsis, G.A., Koskinioti, P., Bourtzis, K., Papadopoulos, N.T.	Effect of Wolbachia Infection and Adult Food on the Sexual Signaling of Males of the Mediterranean Fruit Fly <i>Ceratitis capitata</i>	2022	Insects 13(8),737
Bel Mokhtar, N., Catalá-Oltra, M., Stathopoulou, P., (…), Tsiamis, G., Dembilio, Ó.	Dynamics of the Gut Bacteriome During a Laboratory Adaptation Process of the Mediterranean Fruit Fly, <i>Ceratitis capitata</i>	2022	Frontiers in Microbiology 13,919760
Hernández-Pelegrín, L., Llopis-Giménez, Á., Crava, C.M., (…), Ros, V.I.D., Herrero, S.	Expanding the Medfly Virome: Viral Diversity, Prevalence, and sRNA Profiling in Mass-Reared and Field-Derived Medflies	2022	Viruses 14(3),623
Ramírez y Ramírez, F., Salvador-Figueroa, M., Rosas-Quijano, R., (…), Toledo, J., Quintero-Fong, L.	Sexual performance and survival of males of <i>Ceratitis capitata</i> VIENNA 8 (Diptera: Tephritidae) inoculated with a commercial formulation of <i>Beauveria bassiana</i>	2022	Journal of Applied Entomology 146(1-2), pp. 67-76

Fuente: Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022.

### 3.4 Tópicos tendencias

El análisis de tópicos tendencias permite identificar temas persistentes en la ventana de observación relacionada con la investigación en «Técnica del insecto estéril (TIE)». En la Figura 2 se presentan los tópicos tendencias entre 2016 y 2022.

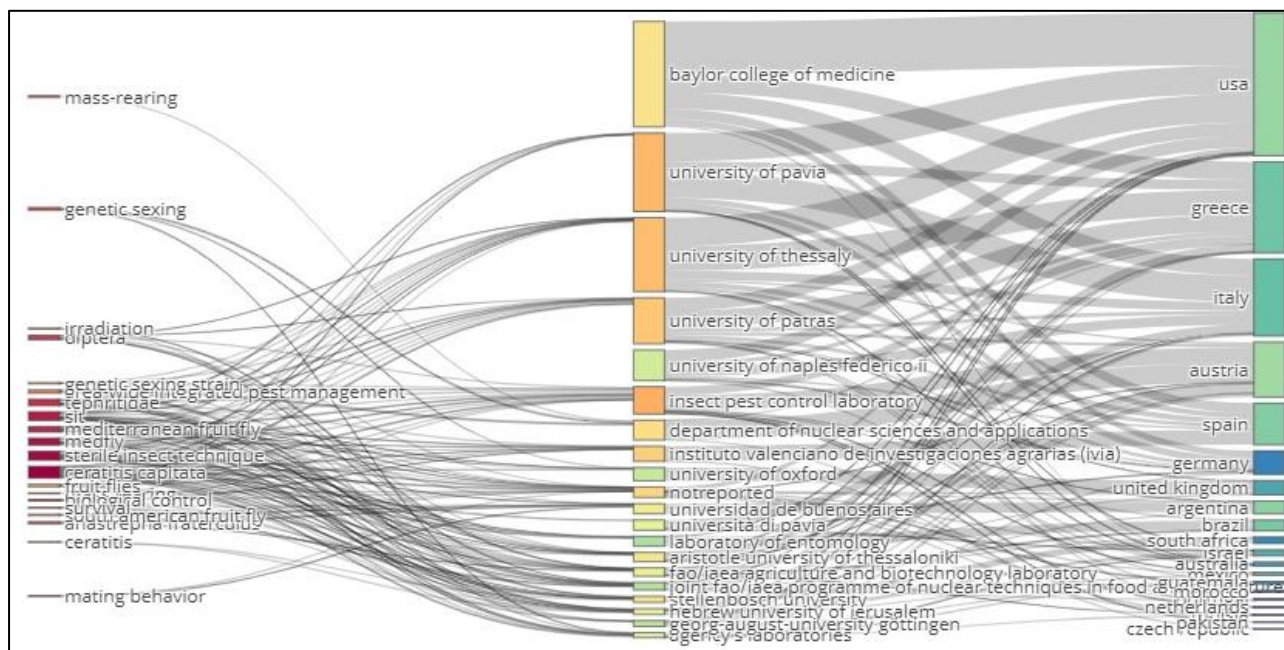


**Figura 2. Dinámica de publicaciones**

Fuente. Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®

### 3.5 Referentes en investigación

La identificación de referentes en investigación a través del análisis de publicaciones científicas permite conocer investigadores, organizaciones, países líderes, y las principales fuentes de consulta (tanto para la divulgación de nuevo conocimiento, como para la consulta de conocimiento de línea base). La Figura 3 presenta una visualización de tres variables (Sankey plot), la cual genera una visualización que permite generar una interrelación entre palabras claves (tópicos más frecuentes), organizaciones (instituciones líderes en investigación), y países (referentes mundiales).

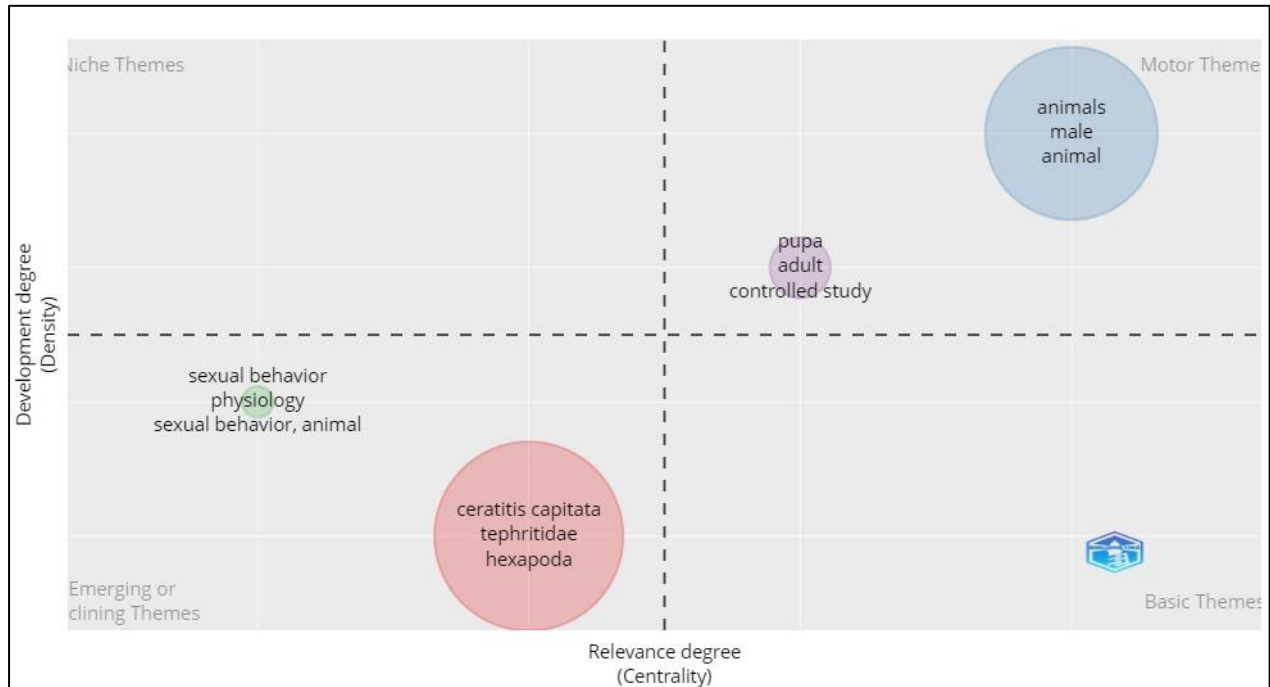


**Figura 3. Referentes en investigación, autores, instituciones, países y fuentes de consulta**

Fuente. Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®

### 3.6 Mapa de distribución temática

El mapa de distribución temática permite categorizar los principales tópicos de investigación por medio de dos dimensiones. La primera dimensión relevancia (grado de centralidad), establece la importancia relativa de cada tópico en el campo de investigación, y la segunda dimensión desarrollo (grado de densidad), establece el avance y amplitud en los conocimientos generados en el campo de investigación. La interacción de esta dos dimensiones conforma cuatro cuadrantes de análisis: i) Temas motor: que comprenden el frente de investigación abarcando los tópicos con mayor relevancia y desarrollo; ii) Temas básicos y transversales: temas con alta relevancia y un desarrollo estable; iii) temas emergentes o decadentes: temas con baja relevancia y desarrollo pero con el potencial de convertirse en temas básicos o transversales, en temas motor o en tema especializados; y, iv) temas nicho o especializados, temas con un alto grado de desarrollo investigativo pero que su relevancia en el campo de investigación aún no es alta. En la Figura 4 se presenta el mapa temático para la investigación en «Técnica del insecto estéril (TIE)».

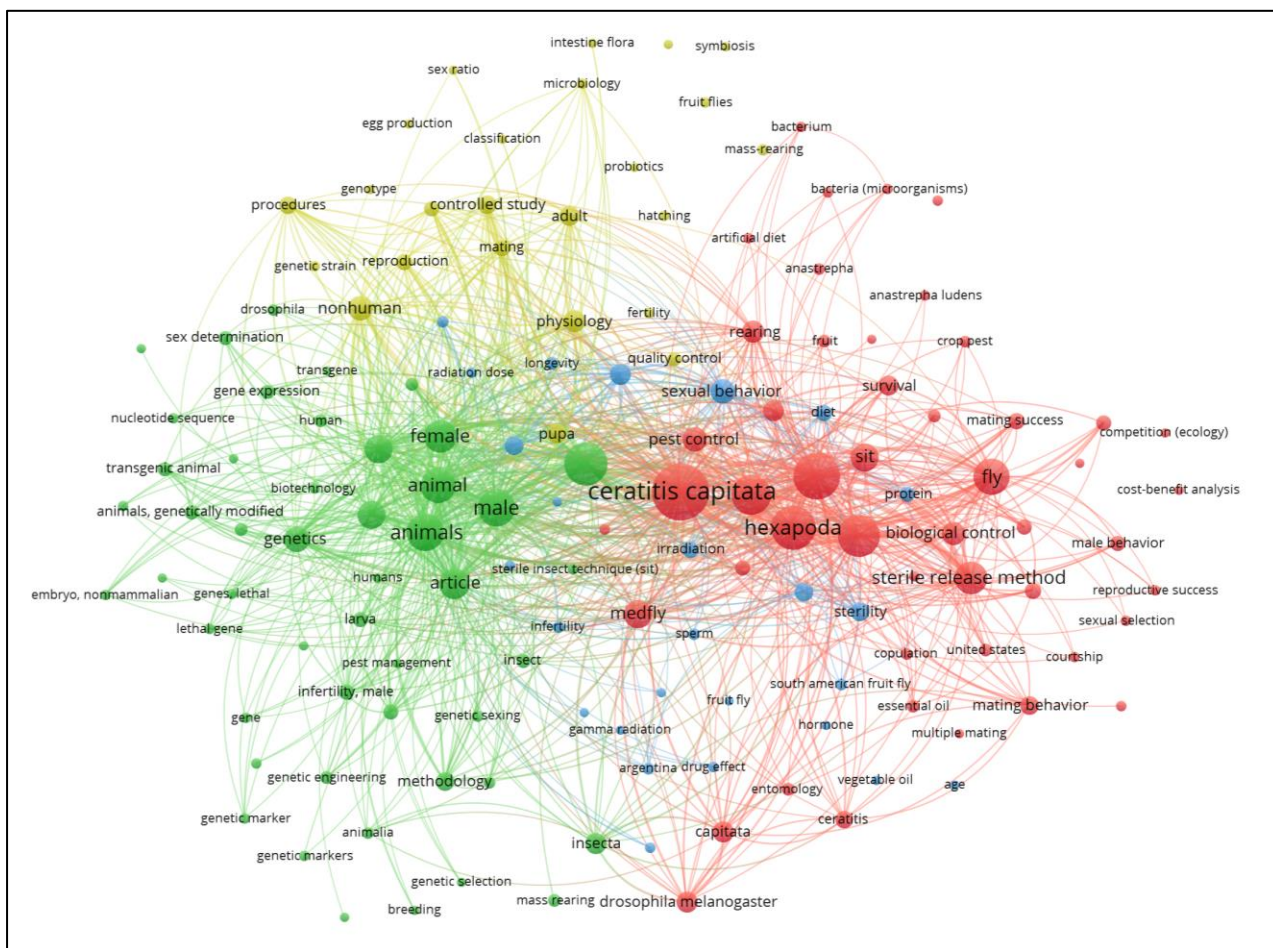


**Figura 4. Mapa temático de distribución de tópicos**

Fuente. Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®

### 3.7 Red de Coocurrencia de tópicos

La red de coocurrencia de tópicos clave permite identificar la manera cómo los tópicos se integran en clústeres temáticos generando focos de investigación. En la Figura 5 se identifican cuatro clústeres que comprenden un total de 148 tópicos clave.



**Figura 5. Red de coocurrencia de tópicos clave**

Fuente. Elaboración a partir de datos Scopus®, consultados en octubre de 2022. Software de análisis Bibliometrix®

Finalmente, la Figura 6 presenta la red de coocurrencia de tópicos a través de una línea temporal en la que la escala de colores de oscuros a claros representa para el periodo 2008- 2021, el desarrollo de los tópicos. Los tópicos en color amarillo comprenden los temas más recientes de investigación en los tópicos de color verde los de mayor crecimiento y los tópicos en color azul los tópicos consolidados.



incluidas reseñas generales (Smith 1966; King y Leppla 1984; Singh y Moore 1985; Anderson y Leppla 1992; Ochieng'-Odero 1994a; Nordlund 1999; Schneider 2009; Cohen 2015; Beuke Boom 2017). Los detalles de los sistemas de crianza específicos utilizados por los diversos proyectos TIE en curso se describen en la literatura publicada. Algunas publicaciones clave para los principales grupos objetivo de plagas de la TIE son:

- Polillas: Zethner (1980), Stewart (1984), Davis (2009), Dyck (2010), Carpenter and Hight (2012), Xsit (2018), Boersma (2021)
- Gusanos barrenadores: Brown (1984), Mahon y Ahmad (2000), Scott et al. (2017), USDA/APHIS (2017)
- Moscas de la fruta: Schwarz et al. (1985), Vargas (1989), Nakamori et al. (1992), Yamagishi y Kakinohana (2000), Cáceres et al. (2014),
- Moscas tsetsé: Feldmann (1994), Gooding et al. (1997), Aksoy (2005), FAO/OIEA (2006), Mosquitos: Gerberg et al. (1994), Balestrino et al. (2014); Carvalho et al. (2014), Zheng et al. (2015a, b), FAO/OIEA (2017a, b, 2018a), Mamai et al. (2017a, 2018), Lees et al. y Weevils: Yamaguchi et al. (2006), Shimizu et al. (2007).

### 3.9 Principios y prácticas de la TIE

La técnica del insecto estéril (TIE) representa un enfoque respetuoso con el medio ambiente para el control de plagas que se integra eficazmente en los programas de manejo integrado de plagas en áreas extensas. A continuación, se enuncian recomendaciones del Libro “Sterile Insect Technique, principles and practice in Area-Wide Integrated Pest Management” publicado en 2021, el cual adopta un enfoque completo y global al describir los principios y prácticas de la TIE, evaluando sus fortalezas, debilidades, éxitos y fracasos desde una perspectiva científica (Dyck, V.A., Hendrichs, J., & Robinson, A.S., 2021).

#### Valor de lograr una comprensión conjunta

Es importante que los científicos y sus instituciones entablen un diálogo significativo con los beneficiarios finales de los enfoques genéticos para el control de plagas, en particular los agricultores y las comunidades afectadas por plagas de insectos y enfermedades transmitidas por insectos, pero también con el público en general. Esto es especialmente

cierto en las iniciativas generadas por los países en desarrollo; y las solicitudes formales de programas de manejo integrado de plagas en toda el área (AW-IPM, por sus siglas en inglés) que integran la TIE a menudo son poco realistas, su implementación está mal administrada (incluida la corrupción en algunos casos) y carecen de una interacción cercana con las comunidades locales y otras partes interesadas. Un gran desafío para los proponentes de intervenciones basadas en la genética es obtener de los países participantes, sus comunidades (especialmente en áreas rurales) y las partes interesadas relevantes el consentimiento fundamentado previo, el compromiso y la propiedad genuina del programa propuesto.

En especies en las que las hembras se aparean múltiples y almacenan esperma en las espermatecas, es importante que el esperma irradiado de los machos estériles sea competitivo con el esperma no irradiado en la fertilización de los óvulos. En especies donde la receptividad de las hembras normalmente termina después del primer apareamiento, nuevamente es importante que los machos estériles induzcan este comportamiento. En especies donde es predominantemente el esperma del último apareamiento el que fertiliza los lotes de huevos, es importante que los machos estériles sean igualmente capaces de mantener este resultado.

### **Sistema de apareamiento**

Vreysen et al. (2006) examinó el efecto potencial de la presencia o ausencia de hembras estériles en la reducción de la cantidad de esperma estéril con el nuevo apareamiento, la reducción de la calidad del esperma estéril con el envejecimiento y la redistribución incompleta de los machos estériles con los insectos silvestres. En los tres casos, las liberaciones de solo machos dan como resultado insectos estériles relativamente más eficientes en comparación con los proyectos que liberan ambos sexos. Un problema con los sistemas de apareamiento elegidos por las hembras es que cualquier deficiencia en el comportamiento o función de los machos estériles puede sesgar a las hembras para que no se apareen con ellos, y esto puede tener graves consecuencias para el éxito de cualquier proyecto TIE.

La TIE depende de inducir una alta proporción de apareamientos estériles en una población natural que reduce la reproducción a un nivel por debajo del mantenimiento de la población.

Por tanto, la producción de insectos, en número suficiente y de calidad adecuada para lograr este objetivo, es uno de los principales requisitos para el éxito de la aplicación de la técnica. Además, dado que la integración de la TIE en un programa de manejo integrado de plagas en toda el área (AW-IPM) compite económicamente con otras técnicas de control, la producción de insectos debe ser oportuna y rentable.

### **Densidad-Dependencia en la regulación de la población**

El comportamiento exacto de la TIE según la densidad de la población parece depender sensiblemente de la biología del sistema. Lawson (1967) y Berryman et al. (1973) señalaron que las poblaciones superpobladas pueden agotar sus recursos lo suficiente como para que la supervivencia hasta la etapa adulta sea baja. En este caso, matar a algunos de ellos (o reducir la producción de huevos) en realidad podría resultar en una mayor supervivencia hasta la etapa adulta, lo que hace que el uso de la TIE sea contraproducente en tal situación. Otra situación podría encontrarse en el caso de una especie de insecto en la que la producción de huevos es mucho mayor de lo que permite el recurso, por ejemplo, la mosca del olivo *Bactrocera oleae* (Rossi), en la que se pone un huevo por fruto. Si los huevos estériles no disuadieran a los insectos de poner más huevos en una fruta que ya contiene un huevo estéril, entonces la reducción en la producción de huevos fértiles tendría que ser sustancial antes de que se notara algún efecto.

### **Tasas de inundación, tasas de liberación y zonas de amortiguamiento**

La tasa de inundación, un parámetro clave, ha sido durante mucho tiempo una medida de la proporción de machos estériles a machos salvajes en la población (Steiner et al. 1965). A veces se piensa que es el tamaño de las liberaciones estériles en comparación con la población silvestre; esto es aproximadamente válido en especies con temporadas reproductivas cortas y generaciones no superpuestas. Sin embargo, en especies con un período reproductivo largo, que a menudo se extiende a lo largo de la estación cálida en climas templados, existe una población de machos estériles que sobrevive después de varias liberaciones, y la tasa de inundación no es igual a la tasa de liberación periódica. Además, para las especies con un período reproductivo corto cada año, la tasa de inundación y de liberación son aproximadamente iguales, lo que permite cierta mortalidad

después de la liberación. Dichas poblaciones producen la misma tasa de liberación estéril requerida para detener el crecimiento de la población y luego mantener la población en equilibrio. En poblaciones que crecen libremente con generaciones superpuestas, la tasa de liberación y la tasa de inundación no son iguales. Según Barclay et al. (2014, 2016), una medida llamada "tasa de liberación estéril requerida ( $r'$ )", se define como el valor de la tasa de liberación de machos estériles,  $r$ , necesaria para detener el crecimiento libre de una población en una distribución de edad estable, es decir, con liberaciones de machos estériles. Tales poblaciones experimentan en gran medida un crecimiento independiente de la densidad, como puede ser el caso de muchas infestaciones puntuales.

Gordillo (2014) amplió este enfoque para incluir la optimización de las liberaciones de machos estériles sobre la base del costo de los machos estériles para una población dependiente de la densidad, e incluyendo la posibilidad de tasas variables de liberación de machos estériles. Usó una ecuación de difusión unidimensional y un proceso numérico llamado "recocido simulado", y concluyó que, en algunos casos, las tasas de liberación estéril deben ser uniformemente altas cerca del límite de alta densidad de plagas de la zona de amortiguamiento, y luego caer bruscamente a niveles mucho más bajos. hacia el área central a proteger.

Estudios recientes de la dispersión de la mosca de la fruta en el Mediterráneo sugieren que una zona de amortiguamiento de 2 km es una primera suposición razonable del ancho de la zona de amortiguamiento. Meats y Smallridge (2007) encontraron que el 90% de las moscas liberadas permanecieron dentro de los 0,4 a 0,7 km del punto de liberación. En Guatemala se ha demostrado que la mayoría de las moscas adultas se dispersan en distancias cortas de solo unos pocos cientos de metros, aunque algunas pueden dispersarse con vientos de hasta 51 km desde el punto de liberación (Villatoro 2014; Enkerlin et al. 2016), y puede ser posible que las moscas se propaguen distancias considerables cuando se agota el recurso alimenticio. Por lo tanto, una zona de amortiguamiento de 2 km podría ser útil si el objetivo del control fuera simplemente producir una infestación de plagas de bajo nivel en un área de producción hortícola de bajo nivel. Sin embargo, una zona de amortiguamiento mucho más amplia probablemente sea más realista, especialmente si el objetivo es la exclusión completa de la plaga de un área protegida.

## Agregación de población

En la naturaleza, la mayoría de las poblaciones no están dispersas uniformemente en el hábitat disponible. Algunos procesos, como la territorialidad, dan como resultado patrones de dispersión que son más regulares. Sin embargo, la mayoría de las poblaciones tenderán a tener un grupo algo agregado que dan como resultado patrones de dispersión aleatorios, por tanto, la agregación es el patrón más difícil de tratar al realizar liberaciones de insectos estériles, porque se debe saber dónde están ubicados los grupos, sumado a esto, muchos aspectos de la agregación involucran componentes de comportamiento. Horng y Plant (1992) modelaron el impacto del apareamiento de lek en la TIE, utilizando una distribución binomial de Poisson. Descubrieron que el efecto de esterilidad, la presencia o ausencia de elección de pareja femenina y la competitividad de apareamiento de machos estériles eran los factores más importantes en su modelo para determinar el éxito de un programa de liberación de insectos estériles.

## Efectos de la depredación sobre la eficiencia de la TIE

Estos efectos fueron modelados por primera vez por Knipling (1979). Su modelo predijo una interacción sinérgica entre la depredación y la liberación de insectos estériles, de modo que el efecto neto sería considerablemente mayor que cualquiera de los dos por separado. Solo se esperaría que esto sea cierto si la depredación es aleatoria, con machos estériles y salvajes igualmente capaces de evadir los ataques de los depredadores. Sin embargo, hay evidencia creciente de que los machos estériles han perdido en gran medida esta capacidad y sufren mucha más depredación (Hendrichs et al. 1994; Hendrichs y Hendrichs 1998; Hendrichs et al. 2007). Por otro lado, la integración de liberaciones aumentativas de parasitoides y la esterilidad heredada puede ser altamente sinérgica (Barclay 1987a, b; Carpenter 2013). Barclay y Mackauer (1980b) incluyeron liberaciones de insectos estériles en el modelo depredador-presa de Lotka Volterra y demostraron que no solo que la tasa crítica de liberación era más baja con depredadores que sin ellos, sino que el sistema también se desestabilizó en gran medida y a menudo se producía un colapso de la población con la liberación.

## TIE con aplicación de insecticida

Podría pensarse que los insecticidas y la TIE son incompatibles porque el insecticida mataría tanto a los insectos estériles como a los fértiles. Sin embargo, Knippling (1964, 1979) razonó que la aplicación de insecticidas mataría tanto a los insectos estériles como a los fértiles en la misma proporción y, por lo tanto, mantendría la proporción de inundación, haciendo compatibles los dos métodos de control, incluso, si los insectos estériles también fueran resistentes al insecticida, entonces la combinación sería aún más efectiva. Sin embargo, los resultados del uso combinado de insecticidas e insectos estériles se volvieron menos claros cuando se incluyeron interacciones bióticas tritróficas específicas, por ejemplo, depredadores o parasitoides. Por ejemplo, si la plaga ya está bajo una depredación considerable, la combinación de insecticida e insectos estériles podría ser perjudicial. Por lo tanto, cuando se usan insectos estériles contra especies con dos etapas de vida, un larvicida parece ser más útil que un adulticida.

Ha habido una marcada tendencia de los insectos a desarrollar resistencia a los insecticidas u otros métodos de control. Es concebible que una población de plagas silvestres pueda desarrollar resistencia al uso de liberaciones estériles como medio de control (Itô et al., este volumen; Lance y McInnis, este volumen; Hendrichs y Robinson, este volumen; Whitten y Mahon, este volumen). Esta resistencia podría implicar mecanismos de comportamiento que impedirían los apareamientos estériles-fértiles (Barclay 1990). La selección por resistencia a varios métodos de control de plagas que operan juntos ha sido modelada por Barclay (1996), y parece que la selección por resistencia a un método de control en particular es una función lineal de la cantidad de mortalidad infligida por ese método de control, y el grado de aislamiento de la población objetivo.

## TIE con trampas de feromonas para la aniquilación de machos

Knippling (1979) descubrió que el uso combinado de liberaciones estériles y trampas de feromonas era menos eficiente que un esfuerzo equivalente puesto en cualquiera de los dos métodos por separado. Esto se debió a la interferencia causada por la matanza de machos estériles en las trampas de feromonas. Como una variante de esta combinación, Knippling propuso que la liberación de insectos estériles tratados con feromonas podría

mejorar la búsqueda de pareja, aumentando así la capacidad competitiva de los insectos estériles, especialmente a bajas densidades. Knipling descubrió que, para los insectos en los que los machos producen feromonas que atraen a las hembras, como el picudo del algodón *Anthonomus grandis* Boheman, la liberación de machos tratados con feromonas aumentaría sustancialmente la eficacia del programa de control, suponiendo que la feromona aplicada no deteriorarse mucho. Knipling también consideró la situación en la que las hembras producen feromonas que atraen a los machos, y modeló la liberación de hembras estériles tratadas con feromonas únicamente. Estos probablemente serían más efectivos si fueran de vida libre en lugar de estar encerrados en trampas. Nuevamente encontró que este método era mucho más efectivo que el uso de hembras estériles no tratadas, y que el control podría ser posible usando hembras estériles tratadas con feromonas donde la liberación de hembras estériles no tratadas sería irremediablemente inadecuada. Knipling (1979) también describió la interacción del metil eugenol (ME) para la aniquilación de machos al mismo tiempo que se liberan machos y hembras estériles, y no encontró interferencias y sí un alto grado de sinergismo. Dado que se ha demostrado el potencial para el desarrollo de resistencia a la EM (Shelly 1997), también podría ser posible incorporar el uso de insectos estériles de la cepa resistente y, por lo tanto, aumentar aún más la eficacia. En el caso de que el atrayente no sea específico del sexo, como en el caso de los cebos alimentarios, Barclay y van den Driessche (1989) demostraron que los dos métodos se combinan de forma sinérgica, especialmente cuando los insectos estériles se alimentan antes de la liberación, y la fecundidad y la supervivencia son elevadas.

### **TIE con Liberación de Parasitoides**

Esta combinación tiene la ventaja de que los parasitoides funcionan bien con altas densidades de hospedantes, mientras que SIT funciona mejor con bajas densidades de plagas. Knipling (1979, 1998) consideró la liberación tanto de machos como de hembras estériles, y también de *Trichogramma* sp. un parasitoide de huevos. Sus tablas mostraban claramente que estos dos métodos eran sinérgicos. Entonces, Si tanto los insectos estériles como los parasitoides se liberan por inundación (Marec et al., este volumen), entonces cada uno debería volverse más eficiente a medida que disminuye la densidad, ofreciendo una poderosa fuente de sinergismo (Knipling 1998).

## TIE con medidas sanitarias y trampas de oviposición

Si el saneamiento destruye el hábitat de oviposición y las trampas eliminan a las hembras que ponen huevos, entonces debería haber un efecto complementario entre los dos, aunque moderado por la dependencia de la densidad. Si también se liberan machos estériles, entonces el sistema tiene tres fuentes de reducción de la población, ninguna de las cuales interfiere con las demás. Knipling (1979) calculó que estos tres deberían resultar en una combinación altamente eficiente para el control.

## Optimización del Programa de Liberación de Insectos Estériles

Geier (1969) utilizó modelos demográficos que incorporaban la dependencia de la densidad para analizar la eficiencia de los programas que liberan insectos estériles y derivar estrategias óptimas para el control. Barclay y Li (1991) utilizaron un tratamiento general de combinaciones de control de plagas para determinar las proporciones óptimas de cada método de control. Atzeni et al. (1992) examinaron la situación del gusano barrenador del Viejo Mundo, *Chrysomya bezzania* (Villeneuve), e incluyeron en su análisis la amplitud de la zona de amortiguamiento, la competitividad de los machos y la agregación de la población. Gordillo (2014) abordó la pregunta de optimización para liberaciones estériles en una zona de amortiguamiento que protege un área libre de insectos, y Ramírez y Gordillo (2016) usaron análisis de costo/beneficio para optimizar las liberaciones estériles para insectos que son longevos, pero tienen corta capacidad reproductiva.

## 3.10 Conceptos erróneos de la TIE

### Especies de hembras monógamas

Es esencial que los machos esterilizados provoquen la misma respuesta que los machos normales durante el apareamiento para terminar con una mayor receptividad de la hembra inseminada. La competitividad del macho liberado se mide luego por la diferencia entre las dos proporciones: machos esterilizados a machos normales versus hembras de campo que han sido inseminadas por las dos clases de machos.

La TIE y los métodos de control genético (así como la interrupción del apareamiento basada en feromonas) son generalmente sensibles a los efectos de la inmigración, particularmente la incursión de hembras ya apareadas con machos de tipo salvaje. En esta situación, la monogamia puede ser una desventaja ya que una hembra inseminada inmigrante, inmune a la abundancia de machos estériles, puede producir descendencia fértil. El impacto negativo de la inmigración sobre la eficacia de la TIE se puede contrarrestar aplicando la técnica en una zona amplia. Las liberaciones deben extenderse más allá del área objetivo, teniendo en cuenta la distribución conocida, la idoneidad del hábitat y la capacidad de dispersión de la plaga.

### **¿Deben los insectos liberados ser completamente estériles?**

Las hembras liberadas deben ser completamente estériles, no tanto por razones ecológicas u operativas, sino por buenas relaciones públicas y para evitar posibles litigios o reclamaciones de compensación. Sin embargo, cuando el objetivo es la supresión y no la erradicación, los machos no necesitan ser tan estériles, especialmente si la dosis más alta requerida para la esterilidad completa reduce significativamente la competitividad. El objetivo de la TIE, como cualquier estratagema de control genético, es impartir una carga genética a la población objetivo. Si eso se puede impartir de manera más eficiente a través de la liberación de menos machos, pero más competitivos, que no sean completamente estériles, entonces esa debe ser la estrategia favorecida.

### **¿La aplicación TIE requiere poblaciones aisladas o un enfoque de área amplia?**

Hay muy pocas situaciones en las que sería apropiado realizar TIE para un solo beneficiario, el aislamiento asegura que el método sea lo más económico posible. Sin embargo, la dispersión a larga distancia de la plaga objetivo es una desventaja en cualquier programa de liberación de insectos estériles, por ello, imponer un enfoque de área amplia y “zonas de barrera” puede, en los programas de supresión, adaptarse a ciertos niveles de inmigración. Si las zonas de barrera son “razonables”, y los costos y beneficios siguen siendo favorables, las barreras físicas al flujo de genes no han demostrado ser absolutamente necesarias.

### ¿Es la erradicación el único objetivo al utilizar la TIE?

La TIE es una herramienta preventiva eficaz, en lugar de una herramienta de erradicación. Se ha demostrado que la TIE es particularmente adecuada para eliminar poblaciones de plagas invasoras de una manera respetuosa con el medio ambiente. Si bien la TIE se vuelve más efectiva a medida que la población objetivo disminuye y aumenta la proporción de machos estériles a fértiles, este atributo positivo de la TIE no debe condenarla a ser exclusivamente una opción de erradicación. La necesidad de utilizar la TIE únicamente para la erradicación es claramente un concepto erróneo, la contención, la prevención y la supresión, más que la erradicación, son el objetivo de la aplicación de la TIE.

### ¿Es la TIE una tecnología independiente o parte de una estrategia de MIP para toda el área?

La TIE no es una tecnología independiente y, por lo tanto, debe integrarse en varios grados con otras tácticas de control. La TIE para moscas de la fruta está integrada con cebos, señuelos y prácticas culturales.

## 3.11 Limitaciones de la TIE

### Asociado al costo

El costo de las estrategias de TIE generalmente incluirá lo siguiente: gastos de monitoreo y alguna otra forma de control para reducir una población objetivo inicial alta, y el costo de comprar y liberar los insectos estériles. En los casos en que no exista un suministro confiable y económico de insectos estériles, el factor decisivo no debe ser solo el costo total de los insectos estériles, sino la importante inversión inicial necesaria para construir y equipar una nueva instalación de producción. El tiempo de inicio para establecer una colonia y alcanzar una producción suficientemente alta también es un factor. Se recomienda que el riesgo se reparta en cada paso del proceso de desarrollo de la TIE mediante la recopilación de pruebas para evaluar los méritos de una mayor inversión para que se convierta en un proceso incremental: si el progreso no es prometedor, es posible retirarse en el camino.

Es importante establecer el “bien público” en los programas financiados con fondos privados y obtener apoyo parcial para ese beneficio en el futuro, como lo ha sido en el pasado identificar e involucrar a los beneficiarios privados en los programas dirigidos por el gobierno.

### **Parámetros adversos de población, ecológicos y de comportamiento**

- Gran tamaño de la población objetivo natural versus métodos para suprimir números antes de la liberación por otros medios (por ejemplo, pesticidas, interrupción del apareamiento, sanidad y otras intervenciones culturales), o simplemente aprovechar las fluctuaciones estacionales.
- Migración de poblaciones no objetivo versus elección del área objetivo para maximizar las barreras de inmigración efectivas
- Baja competitividad de los insectos liberados
- Impacto adverso de las hembras liberadas (daño por picadura de algunas moscas de la fruta o comportamiento de mordedura de plagas que se alimentan de sangre, o vectores transmisores de enfermedades animales o vegetales).
- Factores dependientes de la frecuencia que afectan la competitividad (es decir, proporción de machos liberados a campo) versus proporciones de liberación que minimizan este efecto

### **¿Resistencia a la TIE?**

Se debe tener cuidado para documentar cualquier cambio en el comportamiento y la compatibilidad de apareamiento durante el curso de un programa de liberación de insectos estériles. Sin embargo, tal vez sea más apropiado simplemente evitar el problema manteniendo la variación genotípica dentro de la colonia criada en masa lo más similar posible a la de la población objetivo. Esto puede lograrse “renovando” la variabilidad genética dentro de la cepa criada en masa, como el reemplazo regular de la cepa del gusano barrenador del Nuevo Mundo criada en masa con colonias derivadas del campo o la infusión regular de material genético de la población objetivo en la cultura.

## La escasa competitividad de los insectos liberados

La baja competitividad, cuando ocurre, contribuye a un mayor costo de la SIT, y el costo es quizás la principal limitación para una aplicación más general de la técnica. El programa debe comprometerse a producir y liberar más insectos de los que se requerirían si los insectos liberados fueran iguales a los insectos de campo (silvestres) en su propensión y capacidad de apareamiento. Se sugiere que la competitividad de los machos estériles de la mosca mediterránea de la fruta puede ser, en casos muy extremos, inferior al 1%. Esto implica que se requieren más de 100 machos estériles para equiparar el comportamiento de apareamiento de un solo macho salvaje (fértil).

### 3.12 Principios de la técnica del insecto estéril

Los programas de Manejo Integrado de Plagas en Áreas Amplias (AW-IPM) requieren una planificación a largo plazo, es decir, desde el compromiso de las partes interesadas hasta los estudios de viabilidad, las pruebas piloto y las fases preoperativas y operativas. También necesitan una estrecha colaboración entre investigadores, agricultores, extensionistas, líderes comunitarios, gobiernos locales y regionales y el público en general. AW-IPM es probablemente más apropiado para cultivos de alto valor, plagas clave del ganado y principales vectores de enfermedades humanas; también es apropiado para aquellas áreas rurales donde el número de agricultores es pequeño, la heterogeneidad agroecológica es baja y solo se necesita abordar unas pocas plagas clave.

Un obstáculo importante para la implementación exitosa de AW-IPM es la falta de trabajadores de extensión capacitados, lo que puede conducir incluso a un mayor uso de insecticidas. Una mejor educación de los agricultores y el público en general seguirá siendo clave para una mejor implementación de los programas AW-IPM, y también para comprender mejor las compensaciones económicas entre las alternativas de tratamiento.

Los avances recientes en la ecología del paisaje y el modelado ecológico pueden ayudar a explorar la dinámica temporal y espacial del insecto plaga. Además, la genética del paisaje, un enfoque emergente innovador (que asocia la genética de la población del insecto objetivo con herramientas espaciales) permite comprender cómo las características geográficas y ambientales estructuran las variaciones genéticas a nivel de población. Este

enfoque no solo aumenta el conocimiento ecológico, sino que también explica los patrones genéticos espaciales, el aislamiento por distancia, los límites genéticos al flujo de genes, etc. Todas estas nuevas herramientas y enfoques pueden facilitar la conceptualización de los programas AW-IPM.

### 3.13 Elementos básicos de la TIE

#### ¿Cómo los machos estériles reprimen las poblaciones?

Para obtener una reducción de la población salvaje, el grado de esterilidad introducido en la población salvaje al liberar machos estériles debe ser lo suficientemente alto como para superar la tasa de aumento (éxito reproductivo) de las hembras salvajes.

La densidad de insectos variará en diferentes partes del entorno. Además, la distribución de insectos estériles nunca será uniforme. Por lo tanto, en las operaciones de control, la relación inicial debe ser lo suficientemente alta para tener la certeza de que se producirá una reducción general de la población en todas las partes del entorno desde el principio.

#### Diseño de sistemas de manejos de plagas

El diseño de un sistema de manejo de plagas requiere información sobre la selectividad y eficiencia de las tácticas disponibles. Cuando se requiere la supresión de poblaciones a un nivel muy bajo, se deben integrar métodos que sean efectivos contra poblaciones altas y métodos que sean efectivos contra poblaciones bajas, de modo que las acciones de los primeros potencien las de los segundos.

#### Lecciones aprendidas

Puede ocurrir un período prolongado de retraso entre el inicio de la liberación de insectos estériles y un efecto notable en la densidad de la plaga. En consecuencia, la tasa de liberación debe mantenerse durante un período de tiempo equivalente a varias generaciones. Este período se puede acortar si se aplica un insecticida (o cualquier otra táctica de control que sea eficaz contra las poblaciones silvestres de alta densidad) para matar a las hembras previamente apareadas con machos silvestres.

Los eventos climáticos severos, como los períodos de clima frío, pueden reducir la densidad de la población de plagas y también sincronizar el desarrollo de la población al detener la reproducción y matar las etapas de vida expuestas. De esta forma se puede eliminar el solapamiento generacional. Se debe tener mucho cuidado de no subestimar el rango de vuelo de la plaga. Para la mayoría de los insectos plaga se puede suponer que una hembra inmigrante producirá de 10 a 20 descendientes adultos en un área pequeña. Sin embargo, la progenie puede dispersarse y distribuirse escasamente y, por lo tanto, ser vulnerable a la TIE.

### **Escape y preocupaciones medioambientales**

Un problema exclusivo de la TIE es que se está criando el insecto plaga en sí. Para otra cría a gran escala, por ejemplo, el control biológico clásico o aumentativo, el insecto criado no es la plaga en sí, por lo que es poco probable que cualquier escape del proceso de cría represente una amenaza. Una excepción es cuando la plaga debe criarse como huésped de un parasitoide o depredador, pero los huéspedes vivos se reemplazan cada vez más por huéspedes ficticios o dietas artificiales. Sin embargo, cuando la plaga se está criando, cualquier escape de material fértil representa un riesgo. Por lo general, la cría se lleva a cabo en un área donde la plaga ya está presente, pero si un programa de erradicación tiene éxito, la instalación de cría puede quedarse varada detrás del frente de erradicación y presentar un riesgo sustancial de reinfestación.

Por lo anterior, se requieren procedimientos de contención estrictos, generalmente junto con liberaciones preventivas de insectos estériles y otras medidas de control en las cercanías de las instalaciones de crianza. Una alternativa es ubicar la instalación en un área donde el insecto no pueda, debido a las condiciones ambientales locales, establecer una población autosuficiente, o usar herramientas, como trampas de luz, olor y grávidas, para reducir la cantidad de insectos que escapan.

Probablemente, la mayor preocupación ambiental proviene del proceso de esterilización, que involucra una fuente radiactiva. Los procedimientos estándar para el uso y eventual eliminación de tales fuentes están disponibles y, si se siguen, para minimizar el riesgo (IAEA 2005). La creciente tendencia a sustituir las fuentes isotópicas por sistemas de rayos X reduce considerablemente los riesgos.

Durante las últimas décadas se ha desarrollado aún más la cría masiva de insectos, con importantes mejoras en la industrialización del proceso productivo para la aplicación de la técnica del insecto estéril (TIE). Además de estas mejoras en la producción de insectos estériles, ha habido avances significativos en los procesos de control de calidad, lo que ha aumentado la disponibilidad y el suministro de insectos estériles para su uso en programas de manejo integrado de plagas en áreas amplias (AW-IPM) en todo el mundo.

### Suministro de insectos estériles

La forma más rápida y rentable (al menos a corto plazo) de obtener un suministro continuo de insectos estériles es comprándolos/importándolos de un MRF establecido que cría las especies objetivo-requeridas (Dowell et al. 2000; Blomefield et al. 2011; Bjeliš et al. 2016; Horner et al. 2016; sección 4.6.). En el caso del transporte de larga distancia, por supuesto, la rentabilidad depende del envío; para largas distancias, el costo de envío puede ser considerable y la duración del envío puede afectar la calidad de los insectos estériles. Sin embargo, especialmente cuando las actividades del programa de contención o erradicación son urgentes, la subcontratación de insectos estériles permite que los programas operativos eviten gastar tiempo y recursos económicos en la capacitación del personal, la planificación y la construcción necesarios para establecer un MRF., pues establecer y mantener un MRF operativo es un esfuerzo económico exigente que consume tiempo y requiere una gran inversión. En cambio, al adquirir insectos estériles, los programas de emergencia pueden integrar rápidamente la TIE.

De hecho, en algunos casos los beneficios de la compra de moscas estériles sobre la construcción de un MRF es muy marcado, por ejemplo, programas de áreas objetivo son relativamente pequeñas, zonas donde no se puede establecer un MRF por razones reglamentarias en áreas libres de plagas, algunos programas que comienzan con la compra de moscas estériles (durante algunos años) para establecer y adquirir experiencia con las operaciones de TIE, mientras planifican y eventualmente establecen sus propias instalaciones de cría en masa.

En general, los MRF se construyen para producir insectos estériles para los requisitos de sus propios programas y, por lo tanto, solo unos pocos tienen la capacidad o el interés de producir insectos estériles para los clientes además de los necesarios para su propio uso.

El costo de producción por millón de insectos (huevos, pupas, adultos) se puede reducir en gran medida con economías de escala (Parker, Mamai et al., este volumen). Como regla general, debido a su costo de construcción, la mayoría de los MRF se construyeron con un tamaño menor en lugar de basar la producción en un costo unitario por insecto. En las instalaciones de cría pequeñas, los costos fijos son relativamente altos, lo que aumenta el costo de producción por millón de insectos estériles.

Una mejora importante en la cría y liberación de algunas especies de insectos es la viabilidad de desplegar solo machos estériles, mediante el uso de cepas de sexado genético (GSS) u otros enfoques (Papathanos et al. 2018). En general, esta opción reduce a la mitad los costos de teñido/marcado de insectos, irradiación, envío y liberación aérea, al tiempo que aumenta la eficacia de la TIE en comparación con las liberaciones estándar/ambos sexos (Hendrichs et al. 1995; Rendón et al. 2004). La introducción de GSS que eliminan a las hembras antes de su envío, junto con las eficiencias de cría y las economías de escala, reducen en gran medida los costos de envío y del producto, además de reducir el costo de procesamiento de insectos en las instalaciones de producción o de emergencia y liberación (ERF).

### 3.14 Implicaciones para la elección del procesamiento de insectos

**Tabla 6. Implicaciones para la elección del procesamiento de insectos**

Operar una instalación centralizada que combina un MRF con un ERF que prepara insectos estériles para la liberación	Operar un MRF para crianza y esterilización, y uno o más ERF satélites a los que se envían insectos estériles y donde se procesan para su liberación	Recibir huevos de otra MRF para crianza local, esterilización y liberación
La decisión de establecer una instalación combinada de producción y liberación versus ERF separados normalmente está relacionada con la	Es una buena opción cuando hay adultos estériles emergidos a áreas objetivo-distantes para su liberación, lo que puede resultar en tiempos de	Uso de la TIE en áreas demasiado pequeñas, pruebas y pilotos de desarrollo de programas de TIE, bajo presupuesto para la instalación de un MRF.

<p><b>Operar una instalación centralizada que combina un MRF con un ERF que prepara insectos estériles para la liberación</b></p>	<p><b>Operar un MRF para crianza y esterilización, y uno o más ERF satélites a los que se envían insectos estériles y donde se procesan para su liberación</b></p>	<p><b>Recibir huevos de otra MRF para crianza local, esterilización y liberación</b></p>
<p>conveniencia (directamente en la MRF o ubicada cerca o en el aeropuerto local utilizado para las liberaciones aéreas), así como el tamaño y la distancia desde las áreas objetivo de liberación. Cuando estos pueden ser atendidos desde el MRF/ERF local sin tiempos de ferry excesivos, no hay necesidad de establecer ERF satelitales.</p>	<p>transporte largos y costosos que pueden ser perjudiciales para la calidad de los insectos; el establecimiento de ERF estratégicamente ubicados cerca de los sitios de liberación para minimizar los tiempos de transporte es la alternativa más viable en estos casos.</p>	

### 3.15 Producción Comercial y Liberación de Insectos Estériles

Las industrias agrícolas afectadas pueden desempeñar un papel importante en la creación de conciencia sobre la importancia de los programas de insectos estériles entre sus miembros, líderes gubernamentales y el público (Dyck, Regidor Fernández et al.). Pueden ayudar a desarrollar la confianza en el uso de insectos estériles para la erradicación o supresión de plagas, esto generará una demanda de insectos estériles que, a su vez, atraerá a empresas privadas a invertir en las plantas de producción necesarias para satisfacer esta demanda.

La experiencia en los EE. UU. y en otros lugares indica que, por lo general, es más barato contratar a una empresa privada (para proporcionar aeronaves y pilotos) que comprar aeronaves y pagar el mantenimiento, los pilotos de tiempo completo y los mecánicos. Sin embargo, esto puede no ser cierto en todos los países (debido a las limitaciones en la oferta de dichos servicios), y es necesario realizar un análisis económico detallado para cada programa. Debido a la búsqueda continua de eficiencias operativas, los programas de acción buscan activamente alternativas para realizar lanzamientos aéreos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV); esta iniciativa ya ha desarrollado algunas alternativas para algunas especies de plagas.

### **Envío de insectos estériles**

Hay una gran ventaja en producir, marcar y esterilizar insectos en un MRF y luego enviarlos a un ERF que se dedica a emerger, retener y liberar los insectos estériles.

### **Tiempo y calidad**

Existe un límite en cuanto a la distancia a la que se pueden enviar insectos estériles. La emergencia de adultos y la capacidad de vuelo disminuyen con el aumento del tiempo de envío, incluso cuando se envían pupas en una atmósfera con poco oxígeno (hipoxia). Enkerlin y Quinlan (2004) desarrollaron un estándar internacional para facilitar el envío transfronterizo de insectos estériles. Se puede encontrar un resumen de los envíos transfronterizos de insectos estériles en todo el mundo durante los últimos 50 años en FAO/IAEA (2018b).

Los insectos, por ejemplo, la polilla de la manzana, la mosca mediterránea de la fruta, el gusano barrenador del Nuevo Mundo y la mosca tsetsé se envían habitualmente a lugares cercanos y distantes (Enkerlin y Quinlan 2004; Blomefield et al. 2011; Rull et al. 2012; FAO/IAEA 2014, 2016b, 2017a, b, 2018b; Horner et al. 2016; Dyck, Reyes Flores et al., este volumen). Los envíos de insectos estériles a menudo se realizan alquilando espacio en el compartimiento de carga de las aerolíneas comerciales (que se ajustan a los contenedores/cajas que entregarán una cantidad acordada de insectos estériles). Por lo general, se contrata a una empresa de corretaje para que organice la documentación para la aduana y las líneas aéreas. Las rutas de vuelo optimizadas son obligatorias para reducir

el tiempo de tránsito, la cantidad de aeropuertos utilizados y los desvíos realizados. Los retrasos en los envíos sí ocurren, algunos de ellos se deben a medidas de seguridad, errores en el papeleo, cambios en las rutas o el cambio de prioridad de las aerolíneas al equipaje (entonces la carga no se carga, lo que genera retrasos en la hora de llegada al destino final). Si las pupas se mantienen en hipoxia durante más tiempo que los períodos de tiempo documentados/esperados, la calidad de los insectos adultos resultantes disminuye.

Cuando se envía a destinos muy distantes, la configuración del empaque se modifica para contener enfriadores y bolsas de hielo en cantidad suficiente para garantizar que se mantengan las condiciones de temperatura y humedad relativa. Antes de iniciar los envíos de rutina, se deben enviar envíos de prueba entre las instalaciones de cría y liberación interesadas para documentar las rutas de envío, los costos y la calidad del producto final antes de asumir la viabilidad o no viabilidad del suministro.

### **Envío de huevos**

Una forma adicional de suministro de insectos es enviar las primeras etapas de desarrollo de los insectos, que luego se criarán en el MRF receptor. Los huevos tratados térmicamente de la mosca mediterránea de la fruta (para matar los huevos hembra para la producción de machos solamente) y la cepa de pupa negra (BPS) de la mosca mexicana de la fruta se envían de forma rutinaria con poca o ninguna pérdida en el rendimiento o la calidad del producto resultante. Este procedimiento evita los problemas asociados con el mantenimiento de pupas bajo hipoxia durante largos períodos de tiempo. Como el volumen y el peso de los huevos son mucho menores que los de las pupas, los costos de envío se reducen sustancialmente. Sin embargo, el envío de huevos aún requiere MRF para producir machos y esterilizarlos en el extremo del receptor.

### **Costos de envío**

Una consideración importante relacionada con el establecimiento de ERF satelitales es el costo de envío de insectos esterilizados (Wyss 2000). El costo de envío se reduce en un 50% si se usan GSS (donde se eliminan las hembras, lo que permite el envío de solo machos). Como en el caso de los costos de crianza en masa, los costos unitarios de envío

dependen en gran medida del volumen de pupas que se envían. Los envíos de bajo número de moscas estériles (menos de 5 millones por envío) a proyectos piloto generalmente resultan en altos costos unitarios debido a los costos fijos del agente de aduanas.

### 3.16 Instalaciones de emergencia y liberación

#### Ubicación y diseño

La ubicación estratégica de los ERF y, por lo tanto, su actividad de liberación de insectos estériles es relevante para la eficiencia operativa y los costos. Los ERF que estén ubicados cerca de las áreas donde se realizan actividades de control por el programa de acción verán reducidos sus costos operativos. Tener ERF equidistantes de todas las áreas donde se realizan las liberaciones reduce los costos en tiempos de ferry costosos para realizar liberaciones y regresar a las pistas de aterrizaje del aeropuerto. Para la selección de sitios para establecer un ERF, los tomadores de decisiones del programa de acción también deben considerar todas las condiciones adversas que evitarán que las aeronaves realicen su actividad de liberación de insectos y evitarlas/ minimizarlas al seleccionar la ubicación. Entre los diversos factores a considerar están los patrones de lluvia, los vientos predominantes, la presencia de aeropuertos comerciales en las proximidades que podrían limitar la operación, etc. Al elegir un sitio para el establecimiento de un ERF, existen otros requisitos (que facilitan la estabilidad de las operaciones) que deben ser considerados, por ejemplo, tener un sitio adecuado no muy lejos de todas las instalaciones de una ciudad metropolitana de tamaño mediano (para la comodidad de los trabajadores y obtener servicios de reparación de equipos) pero aún así a una distancia de ella para como para evitar la interrupción de las operaciones diarias (FAO/IAEA 2004, 2012; Parker, Mamai et al., este volumen).

Es relevante que los ERF tengan un suministro confiable de electricidad; sin embargo, la instalación también debe presupuestar la provisión de un generador de planta de emergencia. La provisión de agua potable es fundamental para el ERF; sin embargo, la provisión de agua municipal y/o la perforación de su propio pozo y sistema de potabilización evitará el desabastecimiento en las cantidades de agua que se requieren para este tipo de operaciones. También puede ser necesaria una planta de tratamiento de agua porque las

aguas residuales en los ERF a menudo están contaminadas con polvo fluorescente que surge del lavado de cajas o bandejas y estantes de almacenamiento; esto puede ser un gran problema a menos que se aborde adecuadamente. Un ERF también debe estar cerca de un buen sistema de transporte terrestre. Esto reduce el coste de transporte de pupas o adultos estériles, y también reduce el tiempo que las pupas o adultos están en tránsito, aumentando así la calidad de los insectos adultos resultantes.

### **Equipos de Control Ambiental**

Los ERF deben considerar la relación tiempo/ acumulación de temperatura, por ejemplo, grados día, para establecer la temperatura ambiente de emergencia de adultos para garantizar el tiempo adecuado (en horas) para la emergencia y la edad/ madurez sexual asociada alcanzada en el momento de la liberación del insecto (Parker, Mamai et al. ., este volumen). Además, la humedad relativa juega un papel importante. Si es demasiado bajo, puede ser difícil que emerja un adulto y, por lo tanto, consume reservas de energía críticas antes de la liberación. En cuanto al estado de alimentación de los insectos, la baja humedad deshidrata los insectos estériles, al igual que algunas fuentes de alimento, reduciendo la vitalidad y el número. Por otro lado, en un ambiente de alta humedad, los insectos se adhieren entre sí a las superficies de la pantalla y los alimentos; el exceso de humedad también favorece la presencia de desarrollo de hongos no deseados en la parte superior de los alimentos proporcionados. Por lo tanto, los niveles adecuados de humedad, junto con la limpieza periódica adecuada de las salas de emergencia y el equipo, son importantes para evitar la contaminación de las superficies.

Las condiciones ambientales deben monitorearse constantemente porque las desviaciones de las condiciones requeridas pueden tener un gran impacto en el número de liberaciones y la calidad de los insectos.

### **3.17 Aparición y recolección de insectos estériles**

En algunas especies objetivo, como la mosca de la fruta, los adultos deben mantenerse después de la emergencia durante varios períodos en diferentes tipos de recipientes para alimentación y maduración; luego se recolectan para su liberación trasladando los

contenedores de almacenamiento a cámaras frigoríficas (donde la baja temperatura los hace inactivos).

**Tabla 7. Tipos de sistema de recolección de insectos estériles**

Sistema PARC	Sistema de torre
<p>El uso de estos sistemas requiere que las pupas estériles se dispensen en bolsas de papel en una cantidad predefinida; Se colocan seis bolsas en cada caja PARC. Una vez llenas de pupas, las bolsas se grapan sin apretar en la parte superior para permitir que las moscas estériles emergentes escapen y vivan y se alimenten dentro del contenedor hasta que estén listas para su liberación en el campo. Los paneles de pantalla a los lados del contenedor brindan ventilación, y un panel de pantalla en la tapa permite que las moscas se alimenten de una losa gelatinosa que consiste en agar, sacarosa, agua y un conservante de alimentos, generalmente benzoato de sodio o metilparabeno. Este sistema PARC apilable requiere mucho espacio de ambiente controlado para contener una gran cantidad de estos contenedores voluminosos durante el período de emergencia y maduración de la mosca. También es intensivo en mano de obra. Se han diseñado sistemas automatizados tanto para la carga de las pupas como para la limpieza de las cajas mediante lavadoras industriales. Las bolsas de papel son costosas, tanto en el costo directo como en el de eliminación de</p>	<p>Cada torre consta de marcos de aluminio con paneles de pantalla entrelazados (bandejas) apilados en una base portátil/móvil. Las pupas se colocan en un canal alrededor del perímetro interior de cada bandeja de aluminio. Se colocan una o dos losas de comida gelatinosa en cada panel de pantalla. Se pueden apilar hasta 80 bandejas en una torre, produciendo un sólido bloque tridimensional de aluminio. Para proporcionar circulación de aire, se coloca un pequeño extractor axial de corriente continua en la parte superior de cada torre para proporcionar ventilación ascendente forzada dentro de la torre. Cuando emergen las moscas se desplazan desde el canal perimetral hasta la pantalla de una bandeja, mientras que las puparias vacías quedan en el canal. Las moscas permanecen en la pantalla y se alimentan durante 4-6 días, el período requerido para la emergencia máxima de adultos. El día del lanzamiento al campo, las torres se trasladan a una cámara frigorífica donde los extractores de aire de mayor volumen succionan aire frío hacia cada torre para acelerar la inmovilización de las moscas. Después de un período de</p>

Sistema PARC	Sistema de torre
desechos/basura. Además, algunas moscas se pierden cuando se destruyen las bolsas. Este sistema PARC todavía se usa hoy en día en algunos programas de liberación (aunque hay una tendencia gradual a implementar tecnologías más nuevas).	exposición al frío, las puparias se aspiran de los canales y las bandejas filtradas se voltean manualmente sobre una tolva para recolectar las moscas enfriadas. Después de pesar estas moscas, se transfieren, se transportan y cargan en un avión de liberación.

Los únicos materiales de desecho producidos en el sistema de torre son puparia, residuos de comida y agua del lavador mecánico de bandejas. En general, los requisitos de mano de obra también se reducen, principalmente debido a los procesos automatizados de carga de pupas, separación y eliminación de pupas y lavado de bandejas. Por otro lado, dado que hay menos moscas en cada bandeja de la torre que en una caja PARC, la recolección de moscas enfriadas de las bandejas de la torre es más lenta; por lo tanto, durante el tiempo crítico en el que se deben recolectar moscas enfriadas de las bandejas de la torre, se requiere más trabajo manual (que de las cajas PARC). Por lo tanto, en general, aunque el sistema de torre requiere más mano de obra en el paso final del proceso, es decir, recolectar moscas enfriadas, su costo total es menor que el del sistema PARC debido a la optimización del espacio y al ahorro de mano de obra. costos en los otros pasos del proceso (además de ahorrar el costo de comprar y desechar las bolsas de papel, y el proceso de preparación de la dieta de agar que incluye el costo del agar, la electricidad y la mano de obra), al tiempo que agrega la ventaja principal que las moscas criadas en torres están mejor alimentadas y menos “estresadas” que las criadas con el sistema PARC.

### 3.18 Liberación de insectos estériles

Existen tres enfoques para la liberación de insectos estériles: receptáculos terrestres estáticos (liberación estática), vehículos terrestres móviles (liberación terrestre) y liberaciones utilizando aviones (liberación aérea). La técnica de liberación de adultos refrigerados mencionada anteriormente es complementaria a los métodos de liberación. Se usa justo antes de las liberaciones y su objetivo es producir insectos estériles inactivos

fáciles de manejar que luego se pueden cargar en contenedores de liberación de diferentes tamaños, generalmente cajas o bolsas de meta.

**Tabla 8. Tipos de liberación de insectos estériles**

Liberación estática	Liberación terrestre	Liberación aérea
<p>Contenedores desplegados en el campo en los que se colocan regularmente pupas estériles o insectos adultos. Cuando las pupas se colocan en ellos, los adultos pueden emerger en sincronía con los ciclos diurnos y de temperatura locales, abandonar el receptáculo y dispersarse del sitio durante el día a medida que aumenta la temperatura.</p> <p>El despliegue está limitado por el acceso terrestre a los sitios de liberación, la distribución de insectos estériles está agrupada (con focos separados por áreas de baja densidad de insectos), el aprovisionamiento de receptáculos de liberación requiere mucha mano de obra y los insectos emergidos son muy</p>	<p>Los insectos adultos estériles se dispensan desde camiones de movimiento lento, vehículos todo terreno (ATV) o bicicletas de montaña. Los insectos se liberan a mano o con máquinas, directamente al medio ambiente, o en bolsas abiertas de las que escapan después de la liberación. Para maximizar su dispersión lejos del vehículo o bolsa de liberación, los insectos pueden mantenerse a temperatura ambiente durante el procedimiento de liberación. Las liberaciones terrestres se utilizan regularmente en los programas de moscas de la fruta para complementar las liberaciones aéreas en áreas de difícil acceso. pueden no ser tan uniformes y se producirán</p>	<p>Desde aeronaves descargan directamente adultos estériles refrigerados (técnica de liberación de adultos refrigerados) o expulsan bolsas o cajas que contienen adultos. Los insectos se distribuyen desde la aeronave mediante un transportador motorizado o un tornillo sinfín que transporta los insectos desde la caja de liberación hasta el tubo de liberación. La tasa de liberación se controla variando la velocidad de la barrena y la aeronave. Los lanzamientos aéreos permiten cubrir grandes áreas rápidamente, independientemente de la dificultad del terreno, la falta de caminos o la alta densidad de vegetación. Distribuyen los insectos estériles sobre el área tratada según sea</p>

Liberación estática	Liberación terrestre	Liberación aérea
susceptibles a los malos clima y depredadores que aprenden a visitar los sitios de liberación.	mayores densidades de insectos estériles cerca de las áreas que bordean la ruta de los vehículos de liberación.	necesario. Esta liberación es más sensible al clima que las emisiones terrestres y se requiere un ERF.

Debido a los recientes desarrollos tecnológicos en tecnología aérea y sistemas de guía, los administradores de programas buscan formas alternativas y mejoradas de liberar insectos estériles, para que el proceso sea más eficiente en su cobertura y más rentable. Existen requisitos muy diferentes en cuanto a las tasas de liberación/unidad de área necesarias para lograr el control de plagas. Para moscas de la fruta y mosquitos, por lo general se requieren miles de insectos por hectárea. Esta variación en la tasa de lanzamiento cambia los requisitos de la aeronave, para las moscas de la fruta, en vista de los volúmenes relativamente grandes que se liberarán por área, se requieren aeronaves de ala fija más grandes para maximizar la liberación por vuelo. Dentro de los nuevos desarrollos a tener cuenta están: Aviones de ala fija, aeronaves de ala rotatoria, vehículo aéreo no tripulado (Dron). Estos últimos son particularmente apropiados para situaciones que requieren la liberación de cantidades relativamente pequeñas de insectos estériles y en áreas pequeñas (incluyendo áreas residenciales).



**AGROSAVIA**

Corporación colombiana de investigación agropecuaria