

Detectives del ADN para una plaga global

Daniela Ordaz-Pérez^{1*} y Martha G. Roblero Roblero^{2*}

¹ Grupo de Manejo de Plagas y Vectores de Enfermedades,
Departamento de Ecología de Artrópodos y Manejo de Plagas, El Colegio de la Frontera Sur

² Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), Laboratorio de
Taxonomía, Programa Operativo de Moscas

* Autoras de correspondencia: daniela.ordaz@guest.ecosur.mx, martha.roblero.i@senasica.gob.mx

Imagina un insecto capaz de volar grandes distancias, con adaptación a casi cualquier clima y que puede alimentarse de cientos de frutas. Un insecto que con su sola presencia activa las alertas de un país, produce restricciones comerciales internacionales y genera pérdidas económicas en los productores agrícolas. Este insecto existe y es considerado una plaga de importancia económica en nuestro país: es *Ceratitis capitata* y lo conocemos como la mosca del Mediterráneo. A pesar de haberse declarado a México como zona libre de la mosca del Mediterráneo desde 1982, ratificado el estatus en 2014 en el Diario Oficial de la Federación, frente a esta amenaza, actualmente se combate en el campo y también en el laboratorio, donde el ADN se ha convertido en una herramienta clave para detectar e identificar riesgos a tiempo.

Este pequeño insecto, inofensivo a simple vista, es una de las mayores amenazas para la agricultura mundial, principalmente porque tiene capacidad de infestar más de 300 tipos de frutas y hortalizas, desde cítricos y mango hasta tomate y melón. Las hembras de esta mosca pueden arruinar cosechas completas desde

dentro, porque como parte de su ciclo de vida buscan frutos donde depositar sus huevos. La estructura con la que la hembra inyecta sus huevos dentro de la fruta se conoce como ovipositor y es tan pequeña y fina como una aguja, que con un solo piquete que parece indetectable deposita un gran número de huevos. Esos huevos depositados en las frutas se convierten en larvas a los pocos días y se alimentan del fruto, causando la destrucción del fruto de adentro hacia afuera; por lo que a veces se observa un fruto sano, pero al abrirlo está infestado de larvas de la mosca del Mediterráneo. Conforme van creciendo las larvas, el fruto se va pudriendo por dentro hasta que cae al suelo y permite a las larvas salir fuera. Las larvas se entierran en el suelo y pasan a su siguiente etapa biológica, que son las pupas, donde se encierran en una especie de cápsula protectora para continuar la metamorfosis y posteriormente emerger como moscas adultas (Malacrida *et al.*, 2007).

Por eso, los países libres de esta plaga realizan esfuerzos para mantenerla fuera de su territorio, convirtiéndolo en un reto biológico. Para México, el riesgo no es solamente agrícola, sino también económico y comercial, dado que muchos países importadores mantienen una política de cero tolerancia hacia esta plaga. Por lo que la detección de una sola mosca dentro de un cargamento de fruta puede llevar a la suspensión de los intercambios comerciales. Bajo este contexto, en México se realizan fuertes actividades de manejo integrado de plagas para mantener al país libre.

Un muro invisible contra la mosca

Desde 1978, México implementó el Programa Moscamed para impedir el establecimiento permanente de la mosca del Mediterráneo. A través de vigilancia constante, liberación sistemática de insectos estériles y acciones de respuesta rápida, el programa ha mantenido al país libre de poblaciones establecidas, protegiendo la agricultura de alto valor de exportación. Por lo que además de buscar la erradicación de la plaga, se buscó construir una barrera biológica constante y duradera que permita frenar su avance dentro del país. El principal pilar para lograrlo fue la implementación de la Técnica del Insecto Estéril (TIE).

El fundamento de la TIE consiste en criar millones de moscas macho en laboratorio, las cuales se someten a tratamientos de irradiación que alteran sus células reproductivas e impiden descendencia viable. Estos machos se consideran estériles y son liberados en el campo para competir contra los machos fértiles y aparearse con las hembras de campo. Sin embargo, las hembras apareadas con machos estériles podrán depositar sus huevos en los frutos, pero estos no serán viables. Por lo que no nacerán larvas que se coman las frutas. Con esto no solo se protege la fruta, sino que posteriormente la plaga no se multiplicará, haciendo que la población en campo disminuya hasta desaparecer o se mantenga en niveles bajos que no representen un riesgo económico, de acuerdo con reportes institucionales de evaluación del programa Moscamed (Romeli *et al.*, 2021). Pero aquí surgen preguntas clave: ¿Cómo sabemos que las moscas estériles realmente

están funcionando? ¿Qué pasa con la red de monitoreo con trampas que se encuentra capturando moscas del Mediterráneo constantemente? ¿Cómo sabemos si las moscas capturadas son estériles o fértiles?

La mosca correcta, más allá de la lupa

La correcta identificación del insecto es el punto crítico para tomar cualquier decisión fitosanitaria. Para ello es necesario que todos los insectos sospechosos de ser moscas del Mediterráneo se lleven a una identificación de características morfológicas para determinar su especie y origen. Especialistas entrenados en taxonomía realizan la tarea de observar los insectos en microscopios para reconocer la presencia de estructuras, colores o formas características de la mosca del Mediterráneo. Un ejemplo es la presencia de sedas capitadas, que comúnmente se asocian a su nombre específico “capitata”, y se encuentran en la cabeza de los machos.

Pero no solamente se requiere la identificación de la especie, sino también identificar aquellas que son parte de la barrera biológica generada por la TIE. Aunque las trampas emplean atrayentes selectivos, pueden capturar tanto moscas estériles liberadas por la TIE como individuos fértiles presentes en campo. Por lo que es importante diferenciarlos, ya que la captura de un insecto estéril no tiene impacto en las decisiones de control sanitario, como sí lo tiene la captura de un insecto fértil. En el caso de la TIE, se marca a los insectos provenientes del

laboratorio antes de ser liberados, mediante el baño de un polvo fluorescente que se adhiere como una mancha en la cabeza del insecto (Figura 1). La mancha emite fluorescencia cuando la vemos en luz UV, de esa manera si se encuentran en el campo, pueden ser fácilmente reconocidas por los expertos en taxonomía (Montoya *et al.*, 2010).

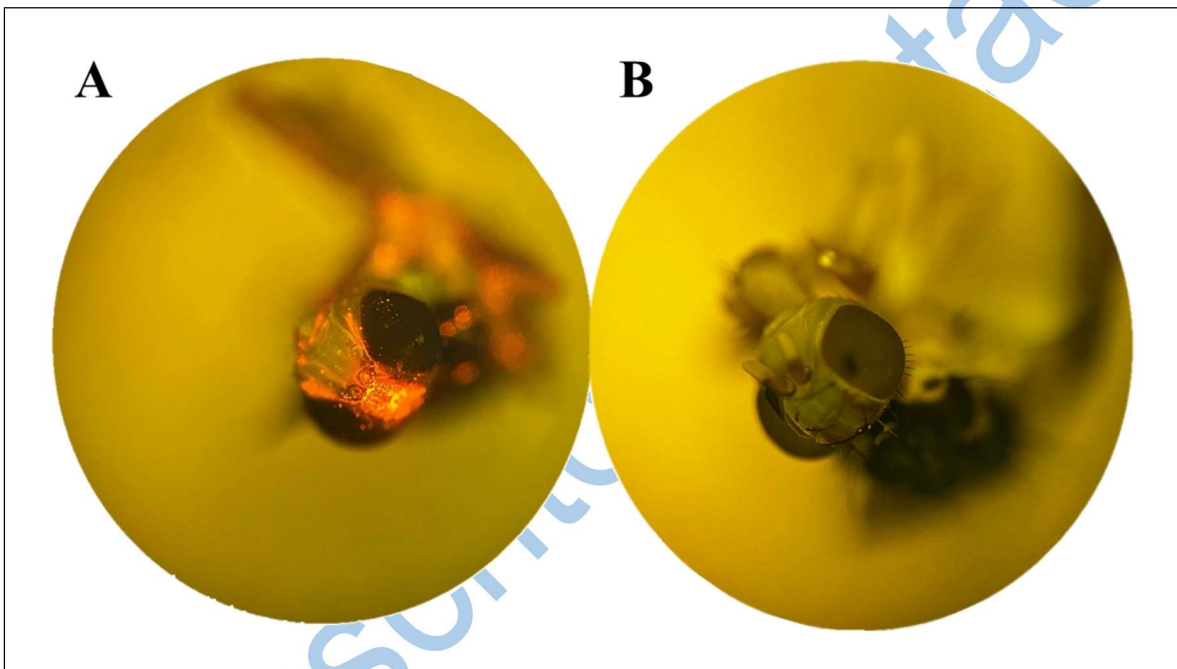


Figura 1. Marcaje de *Ceratitis capitata* en microscopio fluorescente. A) Macho estéril de la TIE, B) Macho silvestre fértil.

¿Qué pasa cuando la pintura no se adhiere correctamente o el insecto pierde la parte teñida? Entonces se requiere buscar otras diferencias, como el hecho de lo que significa ser fértil o estéril. Al momento en que las moscas de la TIE llevan el proceso de esterilidad, se causan daños genéticos que le quitan su capacidad de reproducción; la irradiación provoca alteraciones genéticas en las células

reproductivas y visiblemente se puede observar una deficiencia en el desarrollo del aparato reproductor. Por lo que al observarlo al microscopio, el daño hace visibles los órganos de esas moscas que fueron sometidas a irradiación y por lo tanto es un insecto proveniente de la TIE (Figura 2).

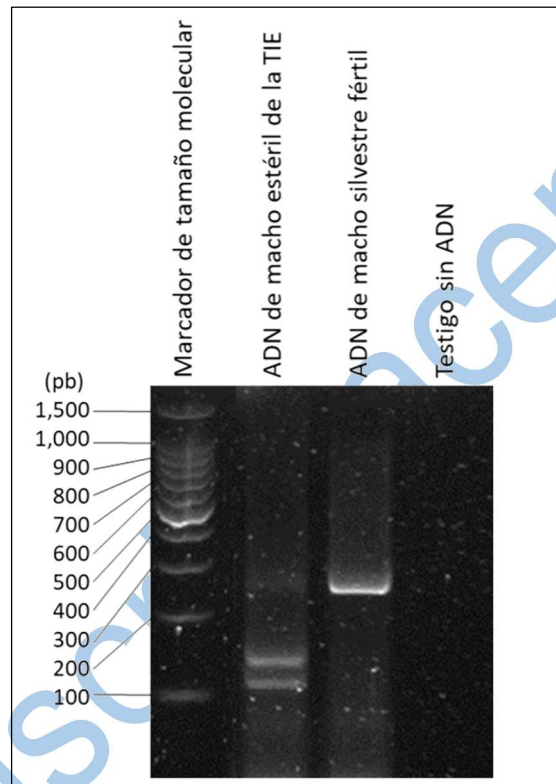


Figura 2. Características citohistológicas y morfológicas de testículos de machos de *Ceratitis capitata*. A) Macho fértil, B) Macho estéril.

Desafortunadamente, a medida que los sistemas de vigilancia se vuelven más complejos y que las condiciones ambientales afectan directamente a las trampas, se vuelve común que no todos los insectos capturados se encuentren en condiciones óptimas para una identificación morfológica (Enkerlin *et al.*, 2015). Factores como la exposición al sol y a la lluvia provocan que los insectos se sequen

o se pudran, y al estar expuestos a depredadores como los pájaros o las arañas, pueden ser devorados y perder estructuras importantes para la identificación como la cabeza o el cuerpo. A veces solo queda un ala, una pata, un fragmento del cuerpo, o simplemente el deterioro del insecto es tan grande que ya no se observan estructuras, formas o colores. En esas condiciones, se vuelve extremadamente difícil o incluso imposible realizar la identificación y la lupa deja de ser suficiente (Giunti *et al.*, 2023). A este desafío se suma otro problema importante: la mosca del Mediterráneo no es la única especie de mosca de la fruta con potencial de aparecer en las trampas. Existen especies que son muy parecidas entre sí, algunas inofensivas desde el punto de vista cuarentenario y otras con un potencial de daño económico importante. El riesgo de confundirlas se refleja en tomar medidas de control de plagas extremas cuando no es necesario, o subestimar un riesgo real. Entonces, ¿qué pasa con aquellos insectos o restos de insectos que no se pueden identificar? Ahí es cuando surge la necesidad de desarrollar herramientas capaces de detectar lo que el ojo humano ya no puede ver, y entra en escena un aliado inesperado: el ADN.

En condiciones reales de vigilancia, no siempre llega al laboratorio una mosca intacta. Con frecuencia se reciben fragmentos, como alas o patas, ejemplares deshidratados o especímenes incompletos. En estos casos, la identificación molecular deja de ser una herramienta complementaria y se convierte en la única opción para el diagnóstico.

El ADN como huella de identidad

Si la observación directa de las características físicas deja de funcionar cuando nos enfrentamos a insectos que llegan dañados o incompletos, existen otros métodos para ver más allá y centrarse en la información que cada organismo lleva dentro concentrada en el ADN. Cada organismo vivo posee en su ADN una especie de huella de identidad biológica, única y presente en cada fragmento del cuerpo.

Aprovechando esta característica, se han desarrollado herramientas capaces de identificar moscas de la fruta a partir de pequeñas cantidades de tejido. Entonces ya no importa que en la trampa solo se encuentre un ala, o incluso restos apenas visibles, porque estos fragmentos contienen suficiente información genética para responder preguntas clave como: ¿de qué especie se trata?, ¿proviene de población silvestre o de la TIE?, ¿representa un riesgo sanitario real?

En el caso de la mosca del Mediterráneo, ciertas regiones de su ADN pueden funcionar como etiquetas biológicas útiles para identificarla, y en algunos casos, aportar pistas sobre su procedencia (Barr *et al.*, 2012). Aunque ningún marcador genético es perfecto por sí solo, estas herramientas resultan especialmente valiosas cuando no se puede realizar la identificación visual. En el caso de las moscas estériles que se producen y liberan por la TIE en México, pueden presentar variantes genéticas útiles para diferenciarlas de las poblaciones que encontramos en campo. Por lo que, aunque los insectos estériles y los de campo sean iguales morfológicamente, su etiqueta genética va a ser diferente (Figura 3).

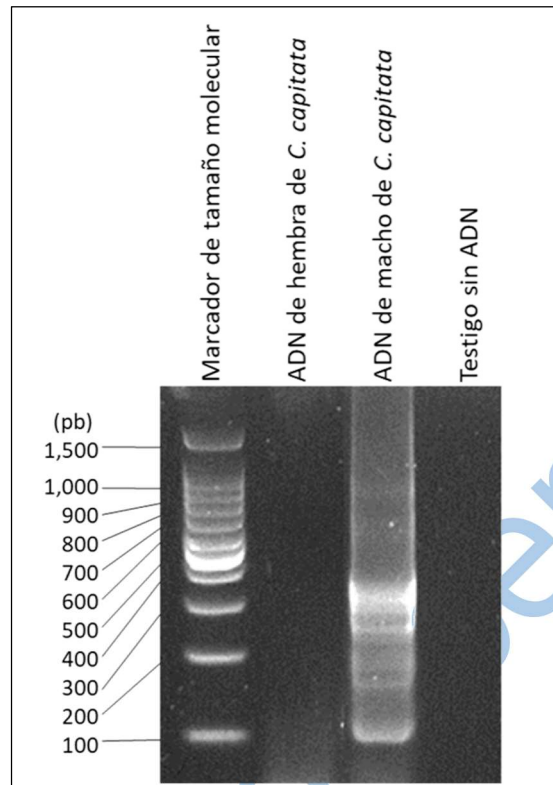


Figura 3. Diferenciación a nivel de ADN en machos de la TIE y silvestres de campo de *C. capitata*.

El análisis de las etiquetas genéticas no requiere grandes cantidades de material ni procesos excesivamente costosos, pero son una herramienta útil para completar la identificación y seguimiento de la mosca de la fruta (Parubrub *et al.*, 2015). Pero el ADN tiene más etiquetas que nos dan información importante, por ejemplo, puede decirnos el sexo del insecto, en caso de que no encontremos el aparato reproductor (Figura 4).

Durante mucho tiempo, se evaluó el éxito de la TIE de manera indirecta, observando la reducción de las poblaciones con el paso del tiempo. Sin embargo, ¿podemos saber si los machos estériles liberados realmente están copulando con

las hembras de campo? Esta respuesta es fundamental para afinar las estrategias de control.



Figura 4. Diferenciación a nivel de ADN en machos y hembras de *C. capitata*.

Cuando se capturan hembras en buen estado, es posible recuperar los aparatos reproductores, específicamente estructuras llamadas espermatecas, que son los reservorios donde las hembras almacenan el esperma para fecundar sus huevos de manera gradual. Con la ayuda de un microscopio puede observarse si hubo apareamiento, pero no permite saber si el esperma proviene de un macho

estéril liberado por la TIE o de un macho fértil de campo. Para responder a esa pregunta, el laboratorio utiliza herramientas moleculares basadas en el análisis del ADN. En primer lugar, se detectan las etiquetas biológicas en el ADN que se relacionan con la presencia del cromosoma Y de los machos. Esta etiqueta nos permite determinar si dentro de la espermateca de la hembra se encuentra guardado espermatozoides de macho (Zhou *et al.*, 2000). Una vez confirmada la presencia de material genético de macho, es posible realizar un análisis complementario para determinar si el espermatozoides pertenece a un macho estéril de la TIE o a un macho fértil del campo, como anteriormente se describió. De esta manera, puede estimarse qué proporción de hembras copulan con machos estériles de la TIE y evaluar qué tan competitivos fueron frente a los machos de campo. Potencialmente, este avance representa un cambio en la evaluación de la TIE y permite tomar acciones sanitarias basadas en evidencia y no solo en suposiciones.

En México, estas herramientas de identificación con ADN forman parte del trabajo cotidiano del laboratorio de taxonomía dentro del Programa Operativo de Moscas. En la práctica se utilizan para resolver dudas referentes a muestras deterioradas capturadas en el sistema de trampas de vigilancia, confirmar identidades y generar información rápida y confiable para la toma de decisiones. De acuerdo con el informe de consecución de metas del programa operativo moscas, durante 2025 se instalaron alrededor de 28,410 tipos de trampas en toda la red de vigilancia del programa, donde se registraron capturas de 2,429 adultos y el 2 % de

los especímenes requirió analizarse con las herramientas de identificación molecular antes descritas (SENASICA 2025a; SENASICA 2025b).

Conclusión

El impacto del manejo integrado de plagas no siempre se manifiesta de manera directa. Muchas veces se refleja en hechos que no ocurren, como cosechas que no se pierden, mercados que permanecen abiertos y frutas que llegan sanas al consumidor. Detrás de cada embarque libre de restricciones existe una red silenciosa de vigilancia, diagnóstico oportuno y estrategias de control eficientes. En el caso de *C. capitata*, la detección temprana es la diferencia entre un evento controlado y un problema con grandes consecuencias económicas y sanitarias. Por ello, los países siempre buscan adelantarse a las medidas de acción y contención.

Las herramientas moleculares basadas en el uso del ADN no reemplazan la identificación morfológica tradicional, pero buscan ser un complemento que brinde respuestas rápidas y precisas cuando las características externas no son suficientes. Gracias a ellas es posible confirmar especies, rastrear rutas de dispersión y evaluar la efectividad de los programas de control como la TIE.

En un mundo donde las plagas viajan con la misma facilidad que el comercio, la identificación oportuna ya no es solo un trabajo más de laboratorio, sino que es el primer paso para proteger la producción agrícola, la seguridad alimentaria y la confianza del consumidor.

Referencias

Barr NB, Islam MS, De Meyer M and McPherson BA (2012). Molecular identification of *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae) using DNA sequences of the COI barcode region. *Annals of the Entomological Society of America* 105:339-350.

Enkerlin W, Gutiérrez-Ruelas JM, Cortes AV *et al.* (2015). Area freedom in Mexico from Mediterranean fruit fly (Diptera: Tephritidae): a review of over 30 years of a successful containment program using an integrated area-wide SIT approach. *Florida Entomologist* 98:665-681.

Giunti G, Benelli G, Campolo O *et al.* (2023). Management of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata*: past, present, and future. *Entomologia Generalis* 43:1241-1263.

Malacrida AR, Gomulski LM, Bonizzoni M *et al.* (2007). Globalization and fruitfly invasion and expansion: the medfly paradigm. *Genetica* 131:1-9.

Montoya P, Toledo J y Hernández E (2010). *Moscas de la Fruta: Fundamentos y Procedimientos para su Manejo*. México: S y G editorial.

Parubrub A, Reyes R, Smallridge CJ *et al.* (2015). Mitochondrial Single Nucleotide Polymorphisms in *Ceratitidis capitata* (Diptera: Tephritidae) Can Distinguish Sterile, Released Flies from Wild Flies in Various Regions of the World. *Journal of Economic Entomology* 108:301-6.

Romeli JR, Rodríguez E, Soto L *et al.* (2021) Evaluación del programa operativo Moscamed 2020. Gobierno de México. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/766001/Evaluaci_n_Moscamed_2020.pdf.

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2025a). Informe de avance de metas al primer semestre. Programa Operativo de Moscas 2025. Gobierno de México. Recuperado de: <https://www.gob.mx/senasica/documentos/informe-primer-semestre-programa-operativo-de-moscas-2024?state=published>.

Zhou Q, Untalan PM and Haymer DS (2000). Repetitive AT rich DNA sequences from the Y chromosome of the Mediterranean fruit fly, *Ceratitidis capitata*. *Genome* 43:434-438.