ARTÍCULO CIENTÍFICO

Alternativas biotecnológicas y sostenibles para el control de *Dactylopius opuntiae* en sistemas de cultivo de *Opuntia ficus-indica*

Guadalupe Medina Ríos[1], Juan E. Barranco Florido[1], Silvia Rodríguez Navarro[1*], Víctor H. Marín Cruz[2]

Resumen. *Dactylopius opuntiae*, "grana cochinilla silvestre del nopal", es una plaga que afecta a *Opuntia ficus-indica*, reduciendo su productividad. El objetivo fue revisar estrategias sostenibles para su manejo. Se consultó literatura científica y técnica (2016-2025) sobre control biológico y hongos entomopatógenos. Las técnicas culturales, como poda y uso de jabones biodegradables, mostraron eficacia parcial. Los depredadores naturales representan una opción de control eficiente; sin embargo, su contribución es variable y depende de condiciones del sistema de producción, especialmente: por la presión de insecticidas (que puede afectar a enemigos naturales) y la disponibilidad de recursos y refugio (vegetación asociada, continuidad de hábitat, recursos alimenticios) que permiten sostener sus poblaciones. En México, la falta de insecticidas autorizados impulsa alternativas biológicas. Hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana* y *Fusarium incarnatum-equiseti* han alcanzado hasta 100% de mortalidad en laboratorio y pueden producirse con sustratos económicos. Por lo tanto, el manejo integrado, combinando métodos culturales, biológicos y de bajo impacto químico, es la vía más viable y sostenible para controlar *D. opuntiae*.

Palabras clave: *Nopal; Cochinilla silvestre; Cladodio; Control biológico; Hongo entomopatógeno.*

Abstract. *Dactylopius opuntiae*, the "wild cochineal of the cactus pear," is a pest that affects *Opuntia ficus-indica*, reducing its productivity. The objective was to review sustainable management strategies. Scientific and technical literature (2016-2025) on biological control and entomopathogenic fungi was consulted. Cultural techniques, such as pruning and the use of biodegradable soaps, showed partial efficacy. Natural predators represent an efficient control option; however, their contribution is variable and depends on production system conditions, especially insecticide pressure (which can affect natural enemies) and the availability of resources

[1] Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco, Ciudad de México, México.

[2] Universidad para el Bienestar Benito Juárez García, Plantel Milpa Alta, Milpa Alta, Ciudad de México, México.

* Autor para correspondencia: snavarro@correo.xoc.uam.mx

Fecha de recepción: 29 de septiembre de 2025—Fecha de aceptación: 3 de abril de 2026

and refuge (associated vegetation, habitat continuity, food resources) that allow their populations to be sustained. In Mexico, the lack of authorized insecticides is driving the development of biological alternatives. Entomopathogenic fungi such as *Beauveria bassiana* and *Fusarium incarnatum-equiseti* have achieved up to 100% mortality in the laboratory and can be produced using inexpensive substrates. Therefore, integrated management, combining cultural, biological and low chemical impact methods, is the most viable and sustainable way to control *D. opuntiae*.

Keywords: *Cactus pear; Wild cochineal; Cladode; Biological control; Entomopathogenic fungus.*

INTRODUCCIÓN

La interacción entre *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Dactylopiidae), comúnmente conocida como cochinilla silvestre del nopal, y *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller (Cactaceae), representa un desafío significativo para la producción agrícola en regiones donde el nopal constituye un cultivo de importancia estratégica, ya sea como fuente de alimento, forraje o materia prima para la industria. El nopal, ampliamente cultivado en países como México, es una cactácea con alto valor económico, social y ecológico, ya que es resistente a condiciones áridas y semiáridas, además de tener usos culinarios, medicinales y cosméticos. Sin embargo, la infestación por *D. opuntiae* ha limitado el desarrollo sostenible del cultivo en diversas regiones del Mediterráneo, África del Norte y Sudamérica (El Aalaoui et al., 2025b).

D. opuntiae se alimenta mediante la succión de la savia de los cladodios del nopal, causando debilitamiento de los tejidos, clorosis, necrosis y en casos severos, la caída prematura de frutos y cladodios. Su biología se caracteriza por un marcado dimorfismo sexual: las hembras son ápteras, sésiles y están recubiertas por una capa cerosa blanca que las protege de depredadores y condiciones ambientales adversas, mientras que los machos son alados, de vida efímera y no se alimentan, ya que su único objetivo es la fecundación (Mazzeo et al., 2019; Perales-Segovia et al., 2024).

Diversas investigaciones han reportado que *D. opuntiae* puede llegar a presentar hasta cinco generaciones anuales bajo condiciones favorables, lo que agrava su impacto sobre el cultivo (Mazzeo et al., 2019). Aunque en algunas regiones, como Sudáfrica, Australia e India, ha sido utilizada como agente de control biológico contra especies invasoras de *Opuntia*, en zonas productoras como México se considera una plaga de importancia económica, debido al bajo contenido de ácido carmínico que presenta (5%) en comparación con *D. coccus* (19-22%) (Rodríguez-Leyva et al., 2024; GMR Canarias, 2020).

La interacción entre *D. opuntiae* y *O. ficus indica* también ha despertado interés por los mecanismos de defensa química inducidos en la planta, como la emisión de compuestos orgánicos volátiles (VOC por sus siglas en inglés), incluyendo terpenos y salicilato de metilo, que actúan como repelentes o como señales para atraer enemigos naturales de la plaga (Rodríguez-Leyva et al., 2024). Estos hallazgos abren nuevas oportunidades para el desarrollo de estrategias de manejo basadas en la ecología química.

El objetivo de esta revisión es proporcionar una síntesis de los enfoques en el manejo de *D. opuntiae*, considerando prácticas culturales como la poda sanitaria y la eliminación de residuos, alternativas no convencionales como el uso de jabones biodegradables, aceites vegetales y silicio orgánico, así como estrategias biológicas basa-

das en la aplicación de hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana*, entre otros. Estas alternativas han demostrado ser eficaces en condiciones de laboratorio, con niveles de mortalidad de hasta el 100% en hembras adultas y ninfas (Ramdami et al., 2022).

Además, se destacan las implicaciones regulatorias, como la ausencia de insecticidas registrados por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), para su uso en nopal de consumo humano, lo que limita las opciones de control químico convencional y resalta la necesidad de alternativas sostenibles. En este contexto, los hongos entomopatógenos han sido estudiados como agentes de control biológico de plagas debido a su eficacia, especificidad y bajo impacto ambiental (Mascarin y Jaronski, 2016; van Lenteren et al., 2018).

METODOLOGÍA

Para esta revisión, se realizó un análisis bibliográfico de artículos científicos, documentos técnicos, tesis de maestría entre 2016 y 2025. Consultando bases de datos académicos como *Web of Science*, *Scopus, CAB Abstracts, ELSEVIER, SciELO, ProQuest, One Academic, DOAJ, Google Scholar* y repositorios institucionales, las palabras clave para la búsqueda fueron: *Dactylopius opuntiae*, *Opuntia ficus-indica*, control biológico mediante microorganismos (hongos entomopatógenos), uso de enemigos naturales (principalmente depredadores), aplicación de insecticidas botánicos y productos de origen natural, prácticas culturales de manejo agronómico y la evaluación de la resistencia o tolerancia del hospedero. Los trabajos fueron seleccionados con base en su pertinencia temática, actualidad, calidad metodológica y relevancia para sistemas productivos de nopal en contextos agrícolas y semiáridos.

RESULTADOS DE LA BÚSQUEDA REFERENCIAS

A partir de la revisión de 10 bases de datos revisadas durante el periodo 2016–2025, se localizaron un total de 70 documentos, principalmente artículos científicos, así como tesis de posgrado, capítulos de libro y documentos técnicos, relacionados con alternativas biotecnológicas y sostenibles para el control de *Dactylopius opuntiae* en sistemas de cultivo de *Opuntia ficus-indica,* los temas que se presenta son: 1)*Dactylopius opuntiae* (Cockerell): Taxonomía y biología, 2)Interacción entre *Dactylopius opuntiae* y *Opuntia ficus-indica,* 3)Técnicas de manejo de *Dactylopius opuntiae,* 4)Control no convencional, 5)Desafíos por el uso de insecticidas químicos, 6)Oportunidades de investigación y desarrollo.

Dactylopius opuntiae (Cockerell): Taxonomía y biología

Las especies del género *Dactylopius* (Hemiptera: Dactylopiidae) entre ellas *D. opuntiae*, muestran en el cuerpo de la hembra adulta un color rojo oscuro, forma ovalada y cubierto de filamentos cerosos blancos (Moussa et al., 2017, El Finti et al. 2022, FAO, 2022 y Abusharya y Ashokri (2025), Ochoa Manzo et al., 2025). Funcionando como una barrera mecánica que protege el cuerpo de la cochinilla de las condiciones adversas por cambios de temperatura y de los depredadores (Mazzeo et al., 2019, Abusharya y Ashokri (2025), Ochoa Manzo et al., 2025). Esta especie presenta diferentes metamorfosis entre macho y hem-

bra. Las hembras son hemimetábolas y los machos holometábolos, *D. opuntiae* presenta los siguientes estadios durante su ciclo: ninfa I móvil, ninfa I fija, ninfa II, pupa, macho adulto y hembra adulta (Palafox-Luna et al., 2018). El sexo de cada ninfa se determina en la etapa de ninfa de segundo estadio, después el ciclo de desarrollo y la morfología varían para machos y hembras. El macho tiene cinco estadios biológicos: huevo, ninfa, prepupa, pupa y adulto, los últimos tres estadios ninfales se desarrollan dentro de pupas (El Aalaoui y Sbaghi (2022); Alhousa et al., 2024; Asaad et al., 2025, Kakoti et al., 2023). A diferencia de Puspitasari et al., (2023) quienes señalan que los machos atraviesan seis estadios (huevo, ninfa I, ninfa II, prepupa, pupa y adulto). Just et al. (2020); Franco et al. (2022); Perales-Segovia et al. (2024); González-Román et al. (2024); Zhao et al. 2024; Remmal et al., (2025) mencionan que la hembra es sésil, áptera, redonda y con forma ovoide de 0.2 a 0.25 cm de longitud o bien 5 mm. El macho tiene un cuerpo rojizo con alas blancas, en el extremo del abdomen presenta dos filamentos blanquecinos, aparato bucal atrofiado y tiene un periodo de vida de 3 a 4 días; su finalidad es copular con la hembra y fertilizar los huevecillos. De acuerdo con (Mazzeo et al. 2019), el ciclo biológico de las hembras adultas es de 77 días, con un periodo de preoviposición de 18.8 días, ovipositando durante 21 días un promedio de 131 huevecillos; mientras que en los machos es de 43 días.

Conocer el ciclo biológico de *Dactylopius opuntiae* es fundamental para comprender su comportamiento, reproducción y desarrollo. En México, Palafox-Luna et al. (2018) describieron el desarrollo del insecto bajo condiciones controladas de invernadero. Por su parte, El Aalaoui y Sbaghi (2022) evaluaron el desarrollo en Marruecos a diferentes temperaturas, identificando el rango de 26–32 °C como favorable para su supervivencia y desarrollo. La duración de los diferentes estadios reportada en ambos estudios se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Duración del desarrollo de *Dactylopius opuntiae* reportada en diferentes estudios y condiciones ambientales

Estadio	Sonora, México (Palafox-Luna et al., 2018)	Marruecos 26 °C (El Aalaoui y Sbaghi, 2022)	Marruecos 32 °C (El Aalaoui y Sbaghi, 2022)
Incubación	61.78 ± 24 min	13.40 d	11.80 d
Ninfa I	♂ 8.59 ± 1.54 d / ♀ 7.68 ± 1.49 d	12.37 d	9.38 d
Ninfa II	♂ 7.74 ± 0.79 d / ♀ 9.07 ± 1.98 d	♀ 14.36 d	♀ 12.04 d
Prepupa	—	♂ 3.53 d	♂ 3.07 d
Pupa	♂ 8.18 ± 1.05 d	♂ 4.33 d	♂ 3.89 d
Adulto	—	♂ 5.97 d / ♀ 15.72 d	♂ 4.11 d / ♀ 7.37 d

Palafox-Luna et al. (2018): cría en invernadero a 23 ± 7 °C y 60 ± 20 % HR; seguimiento en cámara a 25 ± 1 °C y 40 ± 10 % HR. El Aalaoui y Sbaghi (2022): desarrollo evaluado a 26–32 °C y 65 ± 5 % HR. HR = humedad relativa; d = días; min = minutos; ♂ = macho; ♀ = hembra.

Interacción entre *Dactylopius opuntiae* y *Opuntia ficus-indica*

Perales-Segovia et al. (2024) mostraron información sobre la interacción biológica de tipo parásito-hospedero, entre *D. opuntiae* y *O. ficus-indica*, señalando que las hembras se alimentan de la savia del nopal a lo largo de todo su desarrollo (desde huevo, ninfa hasta adulto) y los machos únicamente en sus estadios de ninfas, se alimentan de la savia de los cladodios del nopal ocasionan el debilitamiento general de la planta y de nuevos brotes, lo que provoca que sean de menor calidad y cantidad. GMR Canarias, (2020) reporta que en las Islas Canarias en España, *D. opuntiae,* una vez fijada sobre la planta, causan clorosis y necrosis en los cladodios y frutos, provocando el debilitamiento a la planta y ocasionando la caída prematura. En contraste con su papel como plaga en sistemas productivos, Hernández (2021) señala una interacción diferente en Sudáfrica, Australia, Hawaii, India, Indonesia y Mauritania; donde la cochinilla del nopal al no ser considerada una plaga, ha sido aprovechada por su capacidad para dañar e invadir plantas de *D. opuntia* y reducir su densidad de plantas, por lo que se le ha utilizado como agente de control biológico contra especies invasivas de *Opuntia,* donde no tienen valor alimenticio y de forraje. Rodríguez-Leyva et al. (2024) Montejano-Ramírez et al. (2024) estudiaron la interacción de *O. ficus-indica* con *D. opuntiae* a través de los VOC emitidos en forma de aceites esenciales. Sus resultados mostraron que la infestación induce cambios en la producción de metabolitos como el salicilato de metilo, un compuesto fenólico reconocido como volátil inducido por herbívoros, así como en terpenos como el linalol y alcoholes fenólicos como el *p*-vinilguayacol. Estos compuestos se asocian como respuesta al daño causado por la alimentación de *D. opuntiae* en los cladodios y forman parte del sistema de señales químicas de defensa de la planta, lo que sugiere

un papel dual, defensa directa frente al insecto fitófago y defensa indirecta mediante la atracción de enemigos naturales. En Cactaceae, los compuestos volátiles inducidos por herbivoría (HIPV) median defensas indirectas; en *Myrtillocactus geometrizans* y en el género Opuntia se ha documentado este mecanismo, donde los volátiles pueden repeler herbívoros (Callejas-Chavero et al., 2023). Además, mezclas de HIPV como metilsalicilato, transcariofileno y cis-3-hexenil acetato incrementan la atracción de coccinélidos depredadores (Kumar y Paul, 2025). En este sentido, los volátiles inducidos por herbivoría pueden facilitar la localización de colonias de cochinilla por parte de enemigos naturales, como coccinélidos, neurópteros y dípteros al actuar al actuar como señales químicas asociadas a la interacción entre *O. ficus-indica* y *D. opuntiae* (Palafox-Luna et al. (2018)). Estas evidencias sugieren que los VOC y HIPV juegan un papel clave en los mecanismos de resistencia de *O. ficus indica* y para el diseño de estrategias de manejo de *D. opuntiae* en regiones donde constituye una plaga de importancia económica.

Técnicas de manejo de *Dactylopius opuntiae*

En México, se tienen plantaciones comerciales de la especie *O. ficus-indica*, donde *D. opuntiae* no se considera útil para la obtención del ácido carmínico, ya que solo contiene hasta un 5%, en comparación con la especie de mayor importancia económico-productiva *D. coccus* Costa, al contener entre un 19.4 y 22.9%, por esta razón, *D. opuntiae* carece de valor comercial para la industria del carmín y su presencia en los cultivos de nopal se reconoce principalmente como un factor de daño, por lo que es considerada una plaga de importancia fitosanitaria (Rodríguez et al., 2024). Para su control se tiene la presencia de enemigos naturales, las especies depredadoras más comunes en Tlanepantla, Morelos, fueron *Leucopis bellula* Willinston (Diptera: Chamaemyiidae), *Sympherobius barberi* Banks (Neuroptera: Hemerobiidae), *Laetilia coccidivora* Comstock (Lepidoptera: Pyralidae), *Hyperaspis trifurcata* Schaffer (Coleoptera: Coccinellidae), *Chilocorus cacti* Linnaeus (Coleoptera: Coccinellidae) y los parasitoides *Salpingogaster cochenillivorus* Guerin Meneville (Diptera: Syrphidae) y *Sympherobius angustus* Banks (Neuroptera: Hemerobiidae) (Mendel et al., 2024). Perales-Segovia et al. (2024), aunque no indican la región, mencionan a diferentes especies como: *Chrysoperla carnea* Stephen (Neuroptera: Chrysopidae), *Nephus timberlakei* Gordon (Coleoptera: Coccinellidae) y *Salpingogaster texana* Curran (Diptera: Syrphidae) como enemigos naturales de *D. opuntiae*. Se ha señalado a *Hiperaspis trifurcata* y *Leucopis bellula* Willinston, como depredadores que se alimentan exclusivamente de *D. opuntiae* (Mendel et al., 2020).

La presencia de depredadores naturales tiene un papel importante en el control de *D. opuntiae*, lo que destaca la importancia de su incorporación como control biológico, también promueve y conserva la biodiversidad en las plantaciones para un manejo sostenible de la plaga (Rodríguez-Leyva et al., 2024).

Control no convencional

Perales-Segovia et al. (2024), llevaron a cabo prácticas agrícolas de forma mecánica como la poda de partes infestadas y la eliminación de residuos de cosecha logrando disminuir la incidencia de *D. opuntiae*, otra técnica consiste en un barrido manual con el apoyo de un cepillo de escoba. De acuerdo con García-Pascual et al. (2024) la

destrucción de cladodios infestados, eliminación de hospedantes alternos y manejo de cercos vivos) se reportan como prácticas de base y constituyen la primera línea de contención antes de aplicar tácticas biológicas o químicas. De manera complementaria, en ensayos realizados en Zemamra, Marruecos (El Aalaoui et al., 2025a), se ha demostrado que la combinación de poda sanitaria con tratamientos biológicos y botánicos (jabón negro marroquí, aceites minerales y extractos vegetales) y la aplicación de películas de caolín actúan como barreras físicas y repelentes, pueden incrementar el control de *D. opuntiae* y al mismo tiempo mejorar la salud y producción de *Opuntia ficus-indica*, al mejorar la cobertura y eficacia general de los tratamientos, Mbo Nkoulou & Elhassouny (2025); Ramdani et al. (2025); Hernández-Pérez et al. (2019), llevaron a cabo un ensayo evaluativo en una parcela comercial de nopal verdura (*Opuntia ficus-indica*) localizada en el paraje El Vigía, Tlalnepantla, Estado de Morelos, México, con el objetivo de identificar alternativas de control menos agresivas y más sustentables frente al uso indiscriminado de plaguicidas convencionales. En este estudio se probaron diversas dosis, mezclas y frecuencias de aplicación de un bioinsecticida (GreenSoap) compuesto por sales potásicas de ácidos grasos, tanto solo como en combinación con el insecticida Mark 1000® (Malathion 83.7%), mediante aplicaciones repetidas sobre plantas infestadas. Las aplicaciones sucesivas de las mezclas evaluadas fueron capaces de reducir de manera gradual las poblaciones de cochinilla silvestre en el campo, alcanzando una efectividad biológica de hasta 62% tras la tercera aplicación, y observándose cladodios con menor presencia de estados ninfales de la plaga. En Brasil, se obtuvieron porcentajes superiores al 80% con jabón en polvo, detergente neutro, aceite mineral y vegetal en concentraciones del 5% (Aguiar et al., 2019), así mismo se comprobó el uso y efecto de jabones biodegradables en polvo en concentraciones que van del 0.5 a 3.0% contra ninfas y adultos de hembras de *D. opuntiae*, teniendo porcentajes de mortalidad hasta el 80% al causar obstrucción de los espiráculos y remoción de la capa de cera cuticular, dando como resultado una deshidratación severa que produce la muerte del insecto (García-Pascual et al., 2024). En México, se ha encontrado que el uso dirigido de jabones domésticos y detergentes biodegradables (2–8%) puede reducir significativamente la mortalidad de hembras adultas de *D. opuntiae*, lo que sugiere que estos productos accesibles y de bajo impacto ambiental pueden integrarse como parte de sistemas culturales de control cuando se emplean de forma dirigida (López-Rodríguez et al., 2021). La poda de partes infestadas, la eliminación de residuos, la aplicación de jabones biodegradables, silicio orgánico y aceites vegetales, son técnicas culturales que pueden controlar la presencia *D. opuntiae*, además se minimiza la dependencia de agroquímicos sintéticos, reduciendo el impacto negativo en el medio ambiente y la biodiversidad (Ramdani et al., 2022).

Bashyal et al. (2022) y Lamzira et al. (2025), señalan que las prácticas culturales y mecánicas (saneamiento, remoción de hospederos alternos, cultivos trampa, rotación y ajuste de densidades), junto con la diversificación del agroecosistema (intercalado y manejo de la arquitectura del cultivo), constituyen el eje inicial del Manejo Integrado de Plagas (MIP) al reducir la presión de plagas y favorecer el establecimiento de enemigos naturales. De forma complementaria, Zhou et al. (2024) destacan que estas prácticas optimizan tácticas adicionales (bioinsecticidas, extractos botánicos y agentes microbianos), reduciendo la dependencia de agroquímicos sintéticos. De acuerdo con su biología estacional, en campo está modulada principalmente por la temperatura y la disponibilidad de brotes tiernos de *O. ficus-indica*, lo que determina el número de generaciones anuales, la dinámica poblacional y

la severidad de las infestaciones, así como la eficacia de las tácticas de manejo; por ello, el clima debe integrarse en la planeación del manejo (El Aalaoui et al., 2020; Sabbahi y Hock, 2022; Schowalter, 2025). En sistemas de producción bajo invernadero, la edad y morfología del cladodio, influyen en la biomasa de cochinilla (menor en cladodios jóvenes, con contenido de ácido carmínico similar), lo que sugiere que la poda formativa y la renovación de cladodios pueden incorporarse como herramientas culturales para limitar la colonización de *D. opuntiae* (Arroyo-Figueroa et al., 2020). A escala de paisaje, la interacción entre temperatura y precipitación condiciona la expansión de la plaga y el desempeño de enemigos naturales en programas de control biológico, lo que exige ajustes regionales de las estrategias (Mendel et al., 2024).

Desafíos por el uso de insecticidas químicos

La aplicación de insecticidas convencionales (malatión, Suprathion, Micuate, cipermetrina y permetrina) presenta un desafío, debido a los beneficios inmediatos que ofrecen en el control de plagas, contrastados con las consecuencias a largo plazo para el medio ambiente y la salud humana (Ramírez-Bustos et al., 2018). La Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), indica que se carece de autorización oficial para el uso de estos productos altamente tóxicos e incluso están prohibidos a nivel internacional para emplearse en el nopal (Ramírez-Bustos et al*.,* 2018). Hernández-Pérez et al. (2019), mencionaron sobre el uso indiscriminado de plaguicidas organoclorados y organofosforados utilizados para el control de *D. opuntiae,* el cual ha generado serias problemáticas, entre ellas la resistencia de la plaga, fitotoxicidad en los cladodios, intoxicaciones en los aplicadores y consumidores, así como una alta residualidad en el nopal verdura destinado al consumo humano. García-Pascual et al. (2024), mencionaron que la combinación de productos químicos para combatir la grana cochinilla silvestre del nopal, puede ejercer un efecto negativo en las poblaciones de enemigos naturales de *D. opuntia*.

Quintero Lira et al. (2024) documentan que, en el cultivo de nopal en México, la problemática del uso de plaguicidas persiste desde finales de la década de 2000 y no se limita a la frecuencia de aplicación, sino que incluye el uso de ingredientes activos no autorizados y el bajo cumplimiento de las normas de Buen Uso y Manejo de Plaguicidas. Ante la escasez de productos registrados para *O. ficus-indica*, los productores recurren a organofosforados y otros plaguicidas altamente peligrosos, algunos restringidos o prohibidos, lo que incrementa el riesgo de residuos por encima de los límites máximos permisibles en cladodios para consumo humano. De igual forma, en el Estado de México, la falta de plaguicidas autorizados induce el uso de productos formulados para otros cultivos, en un contexto de vacíos regulatorios (ausencia de límites máximos de residuos específicos para nopal en Codex), lo que compromete la inocuidad (Reyes-Terrazas et al., 2023). Asimismo, la caracterización de sistemas productivos muestra que el manejo químico predomina frente a *D. opuntiae* en unidades con escaso acompañamiento técnico; en la Huasteca Tamaulipeca, la falta de asesoría y de monitoreo de organismos benéficos favorece esquemas de control basados en insecticidas de amplio espectro, reforzando la dependencia química (Zárate-Martínez et al., 2025).

Desde la salud humana, la exposición a organofosforados, carbamatos y piretroides se asocia con intoxicaciones agudas y efectos crónicos (neuroconductuales, endocrinos, inmunológicos), así como con mayor riesgo

de cáncer, enfermedades neurodegenerativas, metabólicas y respiratorias, incluso a exposiciones por debajo de límites ocupacionales tradicionales; el riesgo es mayor en poblaciones vulnerables y trabajadores agrícolas (Shekhar et al., 2024; De Barros Rodrigues et al., 2025).

En el plano ambiental, los plaguicidas reducen la abundancia y diversidad de organismos no objetivo (polinizadores, depredadores y fauna del suelo), alteran servicios ecosistémicos como el control biológico y la descomposición, y desestabilizan redes tróficas, lo que puede favorecer rebotes de plagas y mayor dependencia de insecticidas (Sánchez-Bayo, 2021; Beaumelle et al., 2023; Wan et al., 2025). En sistemas de nopal, estos impactos sugieren que el uso reiterado de insecticidas contra *D. opuntiae* puede debilitar enemigos naturales y reducir la resiliencia del agroecosistema, incrementando la vulnerabilidad ecológica.

Oportunidades de investigación y desarrollo

Una alternativa a los agroquímicos industriales para el manejo de *D. opuntiae* en sistemas de cultivo de *O. ficus-indica* es la investigación y aplicación de hongos entomopatógenos, los cuales presentan especificidad hacia ciertos grupos de artrópodos y, por tanto, constituyen una opción más selectiva y con menor impacto sobre organismos no objetivo (Cisneros-Vázquez et al., 2023). En el contexto del nopal, una línea de investigación prioritaria es el desarrollo de sistemas de producción local de estos hongos mediante fermentación en estado sólido utilizando sustratos económicos y regionalmente disponibles, como arroz, frijol, lenteja, maíz palomero, mijo y salvado de trigo (Ángeles-Vega et al., 2025), así como residuos agroindustriales como bagazo de caña, cascarilla de arroz y olote de maíz (Bautista et al., 2018).

Estos enfoques podrían facilitar la adopción de biocontroladores en comunidades productoras de nopal al reducir costos de producción y la dependencia de insumos externos (Cisneros-Vázquez et al., 2023). Asimismo, la suplementación de medios de cultivo con derivados del caparazón de camarón, como quitina y quitosano, ha mostrado potenciar el crecimiento, la esporulación y la actividad enzimática de *Beauveria bassiana*, lo que podría mejorar la capacidad del hongo para degradar la cubierta cerosa de *D. opuntiae*, una de las principales barreras para la eficacia del control biológico en esta plaga (Nurhangga et al., 2024). Un enfoque reciente de interés para el manejo de *D. opuntiae* es la capacidad de algunos hongos entomopatógenos para establecerse como endófitos en plantas, lo que podría conferir protección indirecta al hospedero y contribuir a reducir la colonización por insectos plaga, además de potenciales efectos en la promoción del crecimiento vegetal (Allegrucci et al., 2020). Explorar esta interacción endófita–nopal representa una oportunidad para desarrollar estrategias preventivas de manejo biológico en sistemas productivos de *Opuntia*. Finalmente, aunque el mecanismo general de infección de *B. bassiana* (Contacto y adhesión, germinación, penetración cuticular y colonización del hemocele) ha sido ampliamente descrito (Harith-Fadzilah et al., 2020; Moreno, 2021), una oportunidad de investigación específica para el sistema *D. opuntiae* consiste en evaluar cómo estos procesos se ven limitados por la cobertura cerosa de la cochinilla y cómo pueden optimizarse mediante formulaciones, coadyuvantes o combinaciones con enzimas hidrolíticas que incrementen la adhesión y penetración del hongo. La evidencia experimental disponible respalda la relevancia de los hongos entomopatógenos como agentes promisorios para el control de *D. opuntiae.*

Ramdani et al. (2022) evaluaron el efecto de diferentes cepas de hongos entomopatógenos sobre *D. opuntiae*. En hembras adultas se observó un oscurecimiento progresivo hacia un tono marrón y una marcada deshidratación, mientras que en ninfas muertas no se registraron cambios de color ni movimiento. Los bioensayos de laboratorio demostraron una alta mortalidad, destacando *B. bassiana* cepa HASS a una concentración de 1×10^8 conidios/ml con un 100% de eficacia, seguida por *B. bassiana* cepa RFSL10, *Akanthomyces lecanii* RFSLV y *Cordyceps farinosa* SPSBI4 con valores cercanos al 98%. En el caso de las ninfas, se alcanzó el 100% de mortalidad con los aislamientos HASS y RFSL10 de *B. bassiana* en la misma concentración. En Brasil, se tiene evidencia de la eficacia de los aislados *Fusarium incarnatum-equiseti*, combinados con extractos de *Chenopodium ambrosioides Linnaeus* (L.) (Amaranthaceae) y *Enterolobium contortisiliquum* (*Vell.*) Morong (Fabaceae) sobre la mortalidad *in vitro* de *D. opuntiae,* donde los aislados de cepas con el código Universidade Federal de Pernambuco, Brasil (URM6779) + 5% de extracto acuoso de *Enterolobium contortisiliquum* (*Vell.*) Morong (Fabaceae) y URM6777 + 5% de extracto acuoso de *Enterolobium contortisiliquum* (*Vell.*) Morong (Fabaceae) causaron los mayores niveles de mortalidad (De Alencar Velez et al*., 2019).*

En ese sentido, la evaluación de la efectividad de *B. bassiana* permite tener una visión más amplia del manejo sostenible de esta plaga, vinculando los procesos biológicos de infección, los factores fisicoquímicos de las formulaciones y la importancia de los coadyuvantes en la eficacia del control biológico, además se demuestra que la eficacia de *B. bassiana* frente a *D. opuntiae* depende no solo de la virulencia del hongo, sino también del tipo de formulación biológica eficiente que puede requerir el equilibrio entre adherencia, viabilidad del agente biocontrolador y selectividad ecológica (Ramdani et al., 2022). Asimismo, en condiciones de campo, la eficacia de *Beauveria bassiana* puede disminuir rápidamente debido a su baja tolerancia a estresores ambientales, particularmente la exposición a radiación UV, temperaturas elevadas y desecación, lo que reduce la persistencia y obliga a incrementar la frecuencia de aplicación. Por ello, el manejo en campo debe acompañarse de estrategias operativas y de formulación orientadas a conservar la viabilidad: aplicar en horarios de menor radiación (tarde/atardecer) y evitar períodos de alta insolación; emplear formulaciones y coadyuvantes que mejoren la adhesión y generen un microambiente protector (biopolímeros/encapsulación, aceites y otros protectores) para amortiguar la inactivación por estrés ambiental; y (reforzar el control de calidad del inóculo y el manejo logístico (almacenamiento y transporte) para mantener la viabilidad hasta su aplicación (Mascarin y Jaronski, 2016; Friuli et al., 2023; Mascarin et al., 2024).

En ese contexto, una vía prioritaria es la caracterización de la variabilidad genética y adaptación local de entomopatógenos para desarrollar bioinsumos regionales eficaces bajo condiciones semiáridas y de alta radiación. Se han identificado bacterias rizosféricas antagonistas asociadas a *O. ficus-indica* con mortalidades >80% en ninfas de *D. opuntiae* (Qessaoui, 2025) y nematodos entomopatógenos nativos formulables con bacterias simbióticas para generar bioinoculantes más robustos, lo que confirma su potencial como "bioinsecticidas vivos" integrables al MIP (El Ainous et al., 2025; Singh et al., 2022).

Otra oportunidad de investigación a destacar es la selección y mejoramiento de germoplasma de Opuntia resistente o tolerante a *D. opuntiae*, una de las tácticas más sostenibles documentadas en Marruecos, sin embargo, su adopción enfrenta retos logísticos (disponibilidad y distribución de material vegetativo, costos y tiempos de

reconversión) y socioproductivos (preferencias varietales, aceptación de mercado y riesgo percibido por productores) (Akroud et al., 2021). La resistencia del hospedero debe concebirse como un rasgo dinámico, sustentado en mecanismos morfológicos, bioquímicos y genéticos, y acompañado de monitoreo de adaptaciones evolutivas de la plaga y de eventuales pérdidas de efectividad de la resistencia, así como del resguardo de la biodiversidad funcional del agroecosistema, particularmente de enemigos naturales, polinizadores y microorganismos benéficos que sostienen el control biológico y la estabilidad del sistema (Schowalter, 2025; Enders y Begcy, 2021; Sadafale et al., 2025). La integración con herramientas biotecnológicas (identificación rápida de genotipos resistentes mediante marcadores de ADN y la siembra alternada de distintas variedades para reducir la presión de selección sobre la plaga) es clave para retrasar la adaptación evolutiva de las plagas y aumentar la durabilidad de los genotipos resistentes (Kumari et al., 2022), que pueden favorecen el establecimiento temprano de enemigos naturales (*Hyperaspis trifurcata*) y reducen la necesidad de aplicaciones químicas en fases iniciales de invasión (Berhe et al., 2022; Mendel et al., 2024).

CONCLUSIONES

El manejo de *D. opuntiae* requiere enfoques integrales y adaptativos, ya que la aplicación aislada de un solo método de control resulta insuficiente para lograr una supresión sostenible de la plaga en sistemas productivos de *Opuntia ficus-indica*.

Los hongos entomopatógenos, particularmente *B. bassiana*, representan una herramienta relevante dentro del manejo biológico; sin embargo, su eficacia en campo depende de factores técnicos (formulación, coadyuvantes, condiciones ambientales y momento de aplicación), por lo que su implementación debe concebirse como parte de un paquete tecnológico y no como una solución única.

De manera complementaria, las prácticas culturales y mecánicas, las alternativas de origen biológico (jabones y aceites biodegradables) y la conservación de enemigos naturales cumplen un papel estratégico en la reducción de la presión inicial de infestación y en la generación de condiciones favorables para el desempeño de los agentes de control biológico.

En este sentido, la revisión respalda que el manejo sostenible de la cochinilla del nopal debe estructurarse bajo un enfoque de Manejo Integrado de Plagas, donde la combinación racional de tácticas culturales, biológicas y de bajo impacto ambiental permita reducir la dependencia de insecticidas sintéticos, mejorar la estabilidad del sistema productivo y avanzar hacia esquemas de producción más sustentables.

BIBLIOGRAFÍA

Abusharya, M. A., y Ashokri, H. A. (2025). *Opuntia* cochineal scale pest, *Dactylopius opuntiae*: Current situation, description, importance, and control methods in countries of the Mediterranean Basin and North Africa. *Acta Biology Forum*, *4*(2), 15–18. https://doi.org/10.51470/ABF.2025.4.2.15

Aguiar, S. C., Querino, L. A. L., Ferreira da Silva, P., y Antunes de Lima, V. L. (2019). Vulnerabilidade da palma forrageira e pecuária bovina no Estado da Paraíba frente ao ataque da cochonilha do carmim. *Revista de Geociências do Nordeste*, *5*, 104–115. https://doi.org/10.21680/2447-3359.2019v5n0ID17977

Akroud, H., Sbaghi, M., Bouharroud, R., Koussa, T., Boujghagh, M., y El Bouhssini, M. (2021). Antibiosis and antixenosis resistance to *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) in Moroccan cactus germplasm. *Phytoparasitica*, *49*(4), 623–631. https://doi.org/10.1007/s12600-021-00897-w

Alhousa, W., Basheer, A. N., y El-Naser, Z. (2024). Study of the biology of the cochineal scale insect, *Dactylopius opuntiae*. *Arab Journal of Plant Protection*, *42*(2), 143–148. https://doi.org/10.22268/AJPP-001240

Allegrucci, N., Velazquez, M. S., Russo, M. L., Vianna, M. F., Abarca, C., y Scorsetti, A. C. (2020). Establishment of the entomopathogenic fungus *Beauveria bassiana* as an endophyte in *Capsicum annuum* and its effects on the aphid pest *Myzus persicae* (Homoptera: Aphididae). *Revista de Biología Tropical*, *68*(4), 1141–1153. https://doi.org/10.15517/rbt.v68i4.41218

Ángeles-Vega, L. S., Ramos-Jaimes, H. G., Espitia-López, J., Garza-López, P. M., y Angel-Cuapio, A. (2025). Fermentación sólida de *Metarhizium robertsii*: sustrato y condiciones de cultivo en la producción de conidios y la eficacia biológica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *16*(3), Artículo e3596. https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3596

Arroyo-Figueroa, G., Medina-Saavedra, T., Pérez-Sánchez, R. E., y Ortiz-Rodríguez, R. (2020). Morfología y edad del cladodio de *Opuntia ficus-indica* sobre la producción de *Dactylopius coccus* Costa y contenido de ácido carmínico. *Nova Scientia*, *12*(25), Artículo 00019. https://doi.org/10.21640/ns.v12i25.2519

Asaad, F., Chikh-Khamis, Z., y Bufaur, M. (2025). Laboratory study of some biological parameters and life table of *Opuntia* cochineal scale insect, *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) in Syria. *Arab Journal of Plant Protection*, *43*(1), 1–9. https://doi.org/10.22268/AJPP-001287

Bashyal, S., Poudel, D., y Gautam, B. (2022). A review on cultural practice as an effective pest management approach under integrated pest management. *Tropical Agroecosystems*, *3*(1), 34–40. http://doi.org/10.26480/taec.01.2022.34.40

Bautista, E. J., Mesa, L., y Gómez Alvarez, M. I. (2018). Alternativas de producción de bioplaguicidas microbianos a base de hongos: el caso de América Latina y El Caribe. *Scientia Agropecuaria*, *9*(4), 585–604. https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.15

Beaumelle, L., Tison, L., Eisenhauer, N., Hines, J., Malladi, S., Pelosi, C., Thouvenot, L., y Phillips, H. R. P. (2023). Pesticide effects on soil fauna communities — A meta-analysis. *Journal of Applied Ecology*, *60*(7), 1239–1253. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14437

Berhe, Y. K., Portillo, L., y Vigueras-Guzmán, A. L. (2022). Resistance of *Opuntia ficus-indica* cv. 'Rojo Pelón' to *Dactylopius coccus* (Hemiptera: Dactylopiidae) under greenhouse condition. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, *24*, 290–306. https://doi.org/10.56890/jpacd.v24i.509

Callejas-Chavero, A., Martínez-Hernández, D. G., Vargas-Mendoza, C. F., y Flores-Martínez, A. (2023). Herbivoría en *Myrtillocactus geometrizans* (Cactaceae): ¿Los parasitoides proporcionan una defensa indirecta o una ventaja directa? *Plants*, *12*(1), Artículo 47. https://doi.org/10.3390/plants12010047

Cisneros-Vázquez, L. A., Penilla-Navarro, R. P., Rodríguez, A. D., Ordóñez-González, J. G., Valdez-Delgado, K. M., Danis-Lozano, R., y Vázquez-Martínez, G. (2023). Entomopathogenic fungi for the control of larvae and adults of *Aedes aegypti* (Diptera: Culicidae) vector of dengue, chikungunya and Zika viruses in Mexico. *Salud Pública de México*, *65*, 144–150. https://doi.org/10.21149/13931

De Alencar Velez, B. A., Diniz, A. G., Barbosa, L. F. S., Da Silva Santos, A. C., Da Costa, A. F., y Tiago, P. V. (2019). Potential of *Fusarium incarnatum-equiseti* species complex isolates with *Chenopodium ambrosioides* and *Enterolobium contortisiliquum* extracts to control *Dactylopius opuntiae*. *International Journal of Tropical Insect Science*, *39*(2), 131–138. https://doi.org/10.1007/s42690-019-00014-9

De Barros Rodrigues, M., Mello da Silva, C. A., Chong-Silva, D. C., y Chong-Neto, H. J. (2025). Pesticides and human health. *Jornal de Pediatria*, *101*(Suppl 1), S70–S76. https://doi.org/10.1016/j.jped.2024.11.008

El Aalaoui, M., Anwar, A., Ilahi, H., y El Mokh, S. (2025b). Factors affecting the control of *Dactylopius*, an invasive pest of cactus crop: Artificial intelligence-based meta-analysis. *Frontiers in Agronomy*, *4*, Artículo 1664240. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1664240

El Aalaoui, M., Bouharroud, R., Sbaghi, M., El Bouhssini, M., y Hilali, L. (2020). Seasonal biology of *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) on *Opuntia ficus-indica* (Caryophyllales: Cactaceae) under field and semi-field conditions. *Ponte*, *76*(1), 259–271. https://doi.org/10.21506/j.ponte.2020.1.17

El Aalaoui, M., Rammali, S., Kamal, F. Z., Ciobica, A., Albert, C., Burlui, V., Novac, B., Bencharki, B., y Sbaghi, M. (2025a). Control de campo integrado de *Dactylopius opuntiae* (Cockerell) (Hemiptera: Dactylopiidae) en *Opuntia* spp. utilizando métodos biorracionales. *Frontiers in Microbiology*, *16*, Artículo 1714087. https://doi.org/10.3389/fmicb.2025.1714087

El Aalaoui, M., y Sbaghi, M. (2022). Temperature dependence for survival, development, and reproduction of the cactus cochineal *Dactylopius opuntiae* (Cockerell). *Insects*, *13*(5), Artículo 426. https://doi.org/10.3390/insects13050426

El Ainous, A., El Aissami, A., Bouchtaoui, E. M., Krif, G., Iraqi, D., Azim, K., Obaid Alfalahi, A., Dababat, A. A., y Mokrini, F. (2025). Aprovechamiento de nematodos entomopatógenos nativos para el control sostenible de plagas en agroecosistemas del norte de África. *CABI Reviews*. https://doi.org/10.1079/cabireviews.2025.0035

El Finti, A., El Boullani, R., Zahidi, A., y El Mousadik, A. (2022). Management of the prickly pear mealy bug, *Dactylopius opuntiae* using bio-insecticide in Morocco. *Advances in Entomology*, *10*(4), 267–274. https://doi.org/10.4236/ae.2022.104019

Enders, L., y Begcy, K. (2021). Unconventional routes to developing insect-resistant crops. *Molecular Plant*, *14*(9), 1439–1453. https://doi.org/10.1016/j.molp.2021.06.029

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2022). *Status of cochineal and Opuntia spp. production in the Near East and North Africa region 2022: A perspective from Jordan, Lebanon, Morocco, the Syrian Arab Republic and Tunisia*. FAO. https://www.fao.org/3/cc3256en/cc3256en.pdf

Franco, J. C., Cocco, A., Lucchi, A., Mendel, Z., Suma, P., Vacas, S., Mansour, R., y Navarro-Llopis, V. (2022). Scientific and technological developments in mating disruption of scale insects. *Entomologia Generalis*, *42*(2), 251–273. https://doi.org/10.1127/entomologia/2021/1220

Friuli, M., Pellegrino, R., Lamanna, L., Nitti, P., Madaghiele, M., y Demitri, C. (2023). Materials Engineering to Help Pest Control: A Narrative Overview of Biopolymer-Based Entomopathogenic Fungi Formulations. *Journal of Fungi*, *9*(9), Artículo 918. https://doi.org/10.3390/jof9090918

García Pascual, E., González Chávez, M. M., Franco Vega, A., Rodríguez Leyva, E., Méndez Gallegos, S. de J., Morales Rueda, J. A., y Bravo Vinaja, A. (2024). Tácticas de control de *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae): un análisis bibliométrico. *Investigación Bibliotecológica*, *38*(98), 13–29. https://doi.org/10.22201/iibi.24488321xe.2024.98.58813

GMR Canarias. (2020, 6 de octubre). *GMR Canarias*. https://gmrcanarias.com

González-Román, P., Hernández-Oaxaca, D., Bustamante-Brito, R., Rogel, M. A., y Martínez-Romero, E. (2024). On the origins of symbiotic fungi in carmine cochineals and their function in the digestion of plant polysaccharides. *Insects*, *15*(10), Artículo 783. https://doi.org/10.3390/insects15100783

Harith-Fadzilah, N., Ghani, I. A., y Hassan, M. (2020). Omics-based approach in characterising mechanisms of entomopathogenic fungi pathogenicity: A case example of *Beauveria bassiana*. *Journal of King Saud University - Science*, *33*(2), Artículo 101332. https://doi.org/10.1016/j.jksus.2020.101332

Hernández Espínola, E. E. (2021). *Toxicidad de cuatro insecticidas sobre Dactylopius opuntiae (Hemiptera: Dactylopiidae)* [Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados]. Repositorio Institucional Colpos. http://colposdigital.colpos.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/10521/4643/Hernandez_Espindola_E_MC_Entomología_Acarología_2021.pdf

Hernández-Pérez, R., Bravo-Silva, G., Martínez-Martínez, J., Hernández, Á. G., y De Jesús Ramírez Pedraza, T. (2019). Evaluación de la efectividad biológica de bioinsecticida para el control de cochinilla silvestre (*Dactylopius opuntiae* Cockerell), en nopal (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.), en Totolapan,

Morelos, México. *Revista Chilena de Entomología*, *45*(4), 515–523. https://doaj.org/article/406962cc5d5d4626b1e1c68be31fc68f

Just, M. G., Dale, A. G., y Frank, S. D. (2020). Gloomy scale (Hemiptera: Diaspididae) ecology and management on landscape trees. *Journal of Integrated Pest Management*, *11*(1), Artículo 24. https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa028

Kakoti, B., Deka, B., Roy, S., y Babu, A. (2023). The scale insects: Its status, biology, ecology and management in tea plantations. *Frontiers in Insect Science*, *2*, Artículo 1048299. https://doi.org/10.3389/finsc.2022.1048299

Kumar, J., y Paul, B. (2025). Role of herbivore-induced plant volatiles in foraging strategy of *Coccinella septempunctata*. *Annual Research & Review in Biology*, *40*(7), 95–100. https://doi.org/10.9734/arrb/2025/v40i72274

Kumari, P., Jasrotia, P., Kumar, D., Kashyap, P. L., Kumar, S., Mishra, C. N., Kumar, S., y Singh, G. P. (2022). Biotechnological approaches for host plant resistance to insect pests. *Frontiers in Genetics*, *13*, Artículo 914029. https://doi.org/10.3389/fgene.2022.914029

Lamzira, R., El Fakhouri, K., Boulamtat, R., Kemal, S. A., Oubayoucef, A., Ramdani, C., Meftah Kadmiri, I., y El Bouhssini, M. (2025). Multifunctional roles of intercropping in the management of insect pests affecting pulse crops: A comprehensive bibliometric analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *9*, Artículo 1599254. https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1599254

López-Rodríguez, P. E., Aquino-Pérez, G., Morales-Flores, F. J., Mena-Covarrubias, J., Rodríguez-Leyva, E., y De Jesús Méndez-Gallegos, S. (2021). Productos no convencionales como alternativa de control de *Dactylopius opuntiae* Cockerell (Hemiptera: Dactylopiidae). *Revista Fitotecnia Mexicana*, *44*(3), 417–424. https://doi.org/10.35196/rfm.2021.3.417

Mascarin, G. M., Golo, P. S., de Souza Ribeiro-Silva, C., Jackson, M. A., y Delalibera Júnior, Í. (2024). Advances in submerged liquid fermentation and formulation of entomopathogenic fungi. *Applied Microbiology and Biotechnology*, *108*, Artículo 451. https://doi.org/10.1007/s00253-024-13287-z

Mascarin, G. M., y Jaronski, S. T. (2016). Production and uses of *Beauveria bassiana* as a microbial insecticide. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, *32*, Artículo 177. https://doi.org/10.1007/s11274-016-2131-3

Mazzeo, G., Nucifora, S., Russo, A., y Suma, P. (2019). *Dactylopius opuntiae*, a new prickly pear cactus pest in the Mediterranean: An overview. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, *167*(1), 59–72. https://doi.org/10.1111/eea.12756

Mbo Nkoulou, L. F., y Elhassouny, A. (2025). Artificial intelligence-based meta-analysis for control of *Dactylopius*. *Frontiers in Agronomy*, *5*, Artículo 1664240. https://doi.org/10.3389/fagro.2025.1664240

Mendel, Z., Protasov, A., Golan, O., Bensimon, D., Kolodny, O., y Suma, P. (2024). Navigating challenges in the management of *Dactylopius opuntiae* (Cockerell): Transitioning from 'introduction biological control' to a preemptive strategy of artificial seeding of a natural enemy. *Biological Control*, *196*, Artículo 105582. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2024.105582

Mendel, Z., Protasov, A., Vanegas-Rico, J. M., Lomeli-Flores, J. R., Suma, P., y Rodríguez-Leyva, E. (2020). Classical and fortuitous biological control of the prickly pear cochineal, *Dactylopius opuntiae*, in Israel. *Biological Control*, *142*, Artículo 104157. https://doi.org/10.1016/j.biocontrol.2019.104157

Montejano-Ramírez, V., Ávila-Oviedo, J. L., Campos-Mendoza, F. J., y Valencia-Cantero, E. (2024). Microbial volatile organic compounds: Insights into plant defense. *Plants*, *13*(15), Artículo 2013. https://doi.org/10.3390/plants13152013

Moreno C., D. H. (2021). *Comparación de dos métodos de producción de Beauveria bassiana y su uso en campo como insecticida microbiano: Revisión de literatura* [Proyecto especial de graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano]. Repositorio Digital Zamorano. https://bdigital.zamorano.edu/items/30233ee3-f5b7-40f7-af8b-53e8f9d7096b

Moussa, Z., Yammouni, D., y Azar, D. (2017). *Dactylopius opuntiae* (Cockerell, 1896), a new invasive pest of the cactus plants *Opuntia ficus-indica* in the South of Lebanon (Hemiptera, Coccoidea, Dactylopiidae). *Bulletin de la Société Entomologique de France*, *122*(2), 173–178. https://doi.org/10.3406/bsef.2017.3194

Nurhangga, E., Nawfetrias, W., Djamas, N., y Jufri, A. (2024). The effect of chitin on the effectiveness of *Beauveria bassiana* formulation product to control cocoa pod borer in vitro. *Menara Perkebunan*, *92*(1), 9–20. https://doi.org/10.22302/iribb.jur.mp.v92i1.550

Ochoa Manzo, G. M., Martínez-Flores, H. E., Rodiles López, J. O., y Portillo, L. (2025). Carmine red from cochineal (*Dactylopius coccus*), a natural dye: A review. *Ciencia Nicolaita*, *93*, 26–34. https://doi.org/10.35830/cn.vi93.827

Palafox-Luna, J. A., Rodríguez-Leyva, E., Lomeli-Flores, J. R., Vigueras-Guzmán, A. L., y Vanegas-Rico, J. M. (2018). Ciclo de vida y fecundidad de *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) en *Opuntia ficus-indica* (Caryophyllales: Cactaceae). *Agrociencia*, *52*(1), 103–114. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000100103

Perales-Segovia, C., Gaona, E. G., Peñuelas-Rubio, O., Covarrubias, J. M., Aguilar, L. P., y Argentel-Martínez, L. (2024). *El Nopal: Principales plagas y enfermedades del nopal en México*. Pantanal Editora. https://doi.org/10.46420/9786585756204

Puspitasari, M., Susilawati, S., Hapsari, A. D., y Harni, R. (2023). Mealybug (*Planococcus* spp., Hemiptera: Pseudococcidae) as a pest on plantation crops and its control techniques: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *1133*, Artículo 012032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1133/1/012032

Qessaoui, R. (2025). Antagonistic rhizospheric bacteria against *D. opuntiae*. *Ciencia Nicolaita*, *93*, 1–15. https://doi.org/10.35830/cn.vi93.831

Quintero Lira, A., Bravo Islas, M., Piloni Martini, J., y López Palestina, C. U. (2024). Problemática del uso de plaguicidas en el cultivo de nopal, *Opuntia ficus-indica*. Revisión. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *8*(4), 801–811. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.12321

Ramdani, C., El Fakhouri, K., Boulamtat, R., Bouharroud, R., Mesfioui, A., Al-Jaboobi, M., y El Bouhssini, M. (2022). Entomopathogenic fungi as biological control agents of *Dactylopius opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) under laboratory and greenhouse conditions. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*, Artículo 997254. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.997254

Ramdani, C., El Fakhouri, K., Tika, A., Sadeq, M. A., Moustaid, O., Taarji, N., y El Bouhssini, M. (2025). Kaolin particle film repellent effect against the wild cochineal *Dactylopius opuntiae* and its impact on cactus pear health. *Scientific Reports*, *15*, Artículo 4321. https://doi.org/10.1038/s41598-025-33560-z

Ramírez-Bustos, I. I., López-Martínez, V., Juárez-López, P., Guillén-Sánchez, D., Alia-Tejacal, I., Rivera-León, I., Saldarriaga-Noreña, H. A., y Jiménez-García, D. (2018). Identificación de envases vacíos de plaguicidas en plantaciones de nopal verdura, *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (Cactaceae), en Morelos, México. *Acta Agrícola y Pecuaria*, *4*(1), 18–25. https://doi.org/10.30973/aap/2018.4.1/3

Remmal, I., El Yamlahi, Y., Bel Mokhtar, N., Galiatsatos, I., Loukovitis, D., Dionyssopoulou, E., Britel, M. R., Stathopoulou, P., Maurady, A., y Tsiamis, G. (2025). Analysis of the bacterial microbiota in wild populations of prickly pear cochineal, *Dactylopius opuntiae* in Morocco. *Insects*, *16*(12), Artículo 1184. https://doi.org/10.3390/insects16121184

Reyes-Terrazas, A. S., Flores-Sánchez, D., Navarro-Garza, H., Pérez-Olvera, M. A., y Almaguer-Vargas, G. (2023). Características y retos del sistema de cultivo nopal verdura en Cuautlacingo, Otumba. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *14*(2), 211–222. https://doi.org/10.29312/remexca.v14i2.3079

Rodríguez-Leyva, E., García-Pascual, E., González-Chávez, M. M., De J. Méndez-Gallegos, S., Morales-Rueda, J. A., Posadas-Hurtado, J. C., Bravo-Vinaja, Á., y Franco-Vega, A. (2024). Interactions of *Opuntia ficus-indica* with *Dactylopius coccus* and *D. opuntiae* (Hemiptera: Dactylopiidae) through the study of their volatile compounds. *Plants*, *13*(7), Artículo 963. https://doi.org/10.3390/plants13070963

Sabbahi, R., y Hock, V. (2022). Control of the prickly pear cochineal, *Dactylopius opuntiae* (Cockerell), in Morocco: An overview. *Journal of Plant Diseases and Protection*, *129*(6), 1323–1330. https://doi.org/10.1007/s41348-022-00655-y

Sadafale, G. V. R., Shashikala, B., Kondaguri, S. R., y Divya, D. M. (2025). Host plant resistance and insect–plant interactions: Nature's silent battle. *Indian Farmer*, *12*(9), 522–528.

Sánchez-Bayo, F. (2021). Indirect effect of pesticides on insects and other arthropods. *Toxics*, *9*(8), Artículo 177. https://doi.org/10.3390/toxics9080177

Schowalter, T. D. (2025). Ecología, uso y manejo de la cochinilla (Hemiptera: Dactylopiidae). *Journal of Integrated Pest Management*, *16*(1), Artículo pmaf033. https://doi.org/10.1093/jipm/pmaf033

Shekhar, C., Khosya, R., Thakur, K., Mahajan, D., Kumar, R., Kumar, S., y Sharma, A. K. (2024). A systematic review of pesticide exposure, associated risks, and long-term human health impacts. *Toxicology Reports*, *13*, Artículo 101840. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2024.101840

Singh, K., Kumar, M., Ahuja, A., Vinay, B. K., Kommu, K. K., Thakur, S., Paschapur, A. U., Jeevan, B., Mishra, K. K., Meena, R. P., y Parihar, M. (2022). Entomopathogenic nematodes: A sustainable option for insect pest management. En A. Rakshit, V. S. Meena, P. C. Abhilash, B. K. Sarma, H. B. Singh, L. Fraceto, M. Parihar y A. K. Singh (Eds.), *Biopesticides*: *Vol. 2: Advances in Bio-Inoculants* (pp. 73–92). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823355-9.00007-9

van Lenteren, J. C., Bolckmans, K., Köhl, J., Ravensberg, W. J., y Urbaneja, A. (2018). Biological control using invertebrates and microorganisms: Plenty of new opportunities. *BioControl*, *63*(1), 39–59. https://doi.org/10.1007/s10526-017-9801-4

Wan, N.-F., Fu, L., Dainese, M., Kiær, L. P., Hu, Y.-Q., Xin, F., Goulson, D., Woodcock, B. A., Vanbergen, A. J., Spurgeon, D. J., Shen, S., y Scherber, C. (2025). Pesticides have negative effects on non-target organisms. *Nature Communications*, *16factory*, Artículo 1360. https://doi.org/10.1038/s41467-025-56732-x

Zárate-Martínez, W., Felipe-Victoriano, M., Alcalá-Rico, J. S. G. J., Hernández-Hernández, A., Méndez-Argüello, B., y Arispe-Vázquez, J. L. (2025). Characterization of the nopal (*Opuntia* spp.) production system in the Huasteca region of Tamaulipas, Mexico. *Agronomía Mesoamericana*, *36*(1), Artículo 60442. https://doi.org/10.15517/am.2025.60442

Zhao, Q., Li, H., Chen, C., Fan, S., Wei, J., Cai, B., y Zhang, H. (2024). Potential global distribution of *Paracoccus marginatus*, under climate change conditions, using MaxEnt. *Insects*, *15*(2), Artículo 98. https://doi.org/10.3390/insects15020098

Zhou, W., Arcot, Y., Medina, R. F., Bernal, J., Cisneros-Zevallos, L., y Akbulut, M. E. S. (2024). Integrated pest management: An update on the sustainability approach to crop protection. *ACS Omega*, *9*(40), 41130–41147. https://doi.org/10.1021/acsomega.4c06628