

12

MATRICES TRIDIMENSIONALES

DE QUITOSANO CON FRACCIONES LIPÍDICAS DE CARICA PAPAYA Y SU ACTIVIDAD BIOLÓGICA
FRENTE A SPODOPTERA FRUGIPERDA

THREE-DIMENSIONAL CHITOSAN MATRICES WITH LIPID FRACTIONS FROM CARICA PAPAYA AND
THEIR BIOLOGICAL ACTIVITY AGAINST SPODOPTERA FRUGIPERDA

Daniel Olea-Casillas¹

E-mail: vash09_96@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6223-211X>

Victor Reyna-Urrutia²

Email: victor_r03_urrutiaa@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2726-392X>

¹ instituto Politécnico Nacional. Morelos. México.

² Universidad de Sonora, Unidad Regional Norte-Campus Caborca. México.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Olea-Casillas, D., & Reyna-Urrutia, V. (2026). Matrices tridimensionales de quitosano con fracciones lipídicas de *Carica papaya* y su actividad biológica frente a *Spodoptera frugiperda*. *Revista Transdisciplinaria de Estudios Sociales y Tecnológicos*, 6(3), 135-144.

Presentación: 11/06/2026

Aceptación: 27/07/2026

Publicación: 01/09/2026



RESUMEN

Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) constituye una de las plagas agrícolas más relevantes del cultivo de maíz debido a su elevada capacidad de dispersión, su amplio rango ecológico y su potencial para generar pérdidas significativas en rendimiento. El control basado en insecticidas sintéticos ha favorecido la aparición de poblaciones resistentes y ha generado preocupaciones asociadas a impactos ambientales y afectación de organismos no objetivo, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas de control biológico y formulaciones basadas en compuestos de origen natural. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo caracterizar una fracción lipídica obtenida a partir de semillas de *Carica papaya* y evaluar su actividad frente a larvas de *Spodoptera frugiperda*, así como explorar su incorporación en matrices tridimensionales de quitosano como sistema material potencial para aplicaciones agrícolas. La fracción lipídica fue analizada mediante espectroscopía de resonancia magnética nuclear (^1H -RMN) y correlación homonuclear, identificándose señales consistentes con cadenas alifáticas largas, presencia de insaturaciones y ambientes químicos compatibles con estructuras lipídicas esterificadas. Paralelamente, se desarrollaron matrices tridimensionales de quitosano mediante gelificación física inducida por difusión de amoníaco y posterior liofilización, las cuales fueron caracterizadas mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico (TGA) con el fin de evaluar cambios estructurales asociados a la incorporación de compuestos lipídicos. Los bioensayos se realizaron con larvas de primer y segundo estadio alimentadas con dieta artificial bajo condiciones controladas, registrándose mortalidad y alteraciones morfológicas durante el desarrollo. Los tratamientos evaluados mostraron efectos adversos sobre el desarrollo larval y pupal, incluyendo mortalidades iguales o superiores al 50 % en concentraciones de referencia y deformaciones en estados inmaduros. En conjunto, los resultados evidencian la actividad biológica de compuestos lipídicos derivados de *C. papaya* y la viabilidad de integrarlos en matrices de quitosano como plataforma material para el desarrollo de estrategias bioinsecticidas alternativas orientadas al manejo de *S. frugiperda*.

Palabras clave:

Biomateriales, control de plagas, insectos, maíz, polímeros naturales.

ABSTRACT

Spodoptera frugiperda (Lepidoptera: Noctuidae) is one of the most significant agricultural pests affecting maize crops due to its high dispersal capacity, broad ecological adaptability, and ability to cause substantial yield losses. Conventional control strategies based on synthetic insecticides have promoted the emergence of resistant populations and raised concerns regarding environmental impacts and effects on non-target organisms, prompting the search for alternative pest management approaches based on natural compounds and biologically compatible formulations. In this context, the present study aimed to characterize a lipid fraction obtained from *Carica papaya* seeds and evaluate its biological activity against *Spodoptera frugiperda* larvae, as well as to explore its incorporation into three-dimensional chitosan matrices as a potential material platform for agricultural applications. The lipid fraction was analyzed using proton nuclear magnetic resonance spectroscopy (^1H -NMR) and homonuclear correlation techniques, revealing signals consistent with long aliphatic chains, the presence of unsaturation, and chemical environments compatible with esterified lipid structures. In parallel, three-dimensional chitosan constructs were produced through physical gelation induced by ammonia diffusion followed by freeze-drying, and were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) and thermogravimetric analysis (TGA) to assess structural modifications associated with lipid incorporation. Bioassays were conducted using first- and second-instar larvae reared on artificial diet under controlled laboratory conditions, and mortality as well as developmental abnormalities were recorded. The evaluated treatments produced adverse effects on larval and pupal development, including mortality levels equal to or greater than 50 % at reference concentrations and morphological deformities in immature stages. Overall, the results demonstrate the

biological activity of lipid-derived compounds from *C. papaya* and support the feasibility of integrating them into chitosan matrices as a material platform for the development of alternative bioinsecticidal strategies aimed at the management of *S. frugiperda*.

Keywords:

Biomaterials, insects, maize, natural polymers, pest control.

INTRODUCCIÓN

La producción de maíz enfrenta pérdidas relevantes asociadas con la presión de plagas insectiles que afectan distintas fases del desarrollo vegetal. Entre ellas, *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) destaca por su amplia distribución, capacidad de dispersión y severidad del daño foliar, con afectación del cogollo y, en infestaciones intensas, daño a estructuras reproductivas y pérdidas productivas reportadas en rangos amplios (Castro et al., 2006).

El control se sustenta predominantemente en insecticidas químicos; sin embargo, los esquemas de aplicación intensiva incrementan la presión selectiva y favorecen la reducción de la susceptibilidad poblacional. A nivel fisiológico, la respuesta adaptativa puede involucrar rutas de biotransformación y detoxificación, incluidos incrementos en sistemas enzimáticos como el citocromo P450 (CYP450), las glutatión S-transferasas (GSTs) y las carboxilesterasas/lipasas, con consecuencias sobre la eficacia de formulaciones lipofílicas. En paralelo, la interacción de compuestos lipídicos con membranas biológicas puede modificar propiedades como la fluidez y la integridad de la bicapa, lo que abre un campo de interés para explorar mecanismos de acción y posibles rutas de tolerancia basadas en cambios en la composición de fosfolípidos, el contenido de esteroides y los procesos de reparación de membrana.

Además de la resistencia, el control químico puede afectar a organismos no objetivo y debilitar el control biológico. Se ha documentado toxicidad derivada de la aplicación tópica de diversos insecticidas y reguladores del crecimiento sobre larvas depredadoras de *Chrysoperla carnea*, un enemigo natural relevante (Medina et al., 2003). En consecuencia, la evaluación de alternativas con menor impacto ambiental y mayor compatibilidad ecológica constituye una prioridad, particularmente aquellas basadas en productos naturales biodegradables y con estructuras químicas diversas (Ali Khan et al., 2021).

En este marco, se han reportado efectos biológicos de semillas de *Carica papaya* incorporadas en dietas artificiales, así como estudios en los que se fraccionan y evalúan mezclas de compuestos con actividad frente a *S. frugiperda* (; Bermúdez-Torres et al., 2009; Franco et

al., 2006). No obstante, la aplicación directa de compuestos lipídicos suele enfrentar limitaciones relacionadas con su estabilidad, dispersión y permanencia sobre el cultivo (Pérez-Gutiérrez et al., 2011; Santana et al., 2022). Por ello, la problemática no se reduce a identificar bioactividad, sino que comprende también el desarrollo de sistemas materiales capaces de vehiculizar estos compuestos y mantener su desempeño bajo condiciones operativas.

El quitosano es un biopolímero capaz de formar películas, hidrogeles y matrices porosas tridimensionales, con propiedades fisicoquímicas relevantes para el desarrollo de formulaciones. La incorporación de componentes lipídicos puede modificar su interacción con el agua (Abdollahi et al., 2012; Altioek et al., 2010), su estructura interna y su comportamiento físico, como se ha descrito en sistemas en forma de película que incorporan ácido esteárico, ácido oleico o aceites esenciales (Brazelle et al., 2010; Hosseini et al., 2009). Estas evidencias justifican (Madera-Santana et al., 2022; Meléndez-Pastor et al., 2014) el estudio de matrices tridimensionales funcionalizadas, aunque sus propiedades y efectos dependen del modo de incorporación de los componentes y de la arquitectura del material.

Con base en lo anterior, este estudio se orientó a: 1) caracterizar los compuestos lipídicos y ácidos grasos asociados con semillas de *C. papaya* mediante resonancia magnética nuclear (RMN) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR); 2) desarrollar matrices tridimensionales de quitosano funcionalizadas mediante gelificación física y liofilización; y 3) evaluar su efecto bioinsecticida frente a larvas tempranas de *S. frugiperda* en condiciones controladas. El alcance del trabajo se circunscribe a la evidencia espectroscópica y térmica, así como a los bioensayos reportados; cualquier inferencia sobre liberación controlada o desempeño en condiciones de campo requiere mediciones cinéticas y validación adicional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon 100 kg de frutos de *Carica papaya* L. var. Maradol y 50 kg de frutos de *C. papaya* var. Amarilla, adquiridos en el Centro de Abastos de la Ciudad de México (México). Los frutos se seleccionaron considerando su integridad física, ausencia de daño mecánico visible y madurez homogénea. Las semillas se extrajeron en el Laboratorio Nacional de Ciencias Biológicas (BSLN) del Instituto Politécnico Nacional y se secaron a temperatura ambiente (27 ± 2 °C) durante tres semanas. El secado se realizó con el propósito de homogeneizar el material, disminuir la humedad superficial y reducir la proliferación microbiana. Posteriormente, las semillas se separaron por variedad, se trituraron en un mortero de porcelana y se tamizaron utilizando una malla de 0,415 mm, con el

propósito de aumentar el área específica y favorecer la extracción mediante solvente.

La extracción de los compuestos lipídicos se realizó mediante lavados consecutivos con acetona al 70 %, empleando un embudo de vidrio de borosilicato conforme a la norma ISO 4800 y una llave de paso de politetrafluoroetileno (PTFE; Fisherbrand™). Se utilizó una relación sólido:solvente de 1:3, un tiempo de contacto de 5 min y tres extracciones sucesivas. El extracto se recuperó mediante evaporación del solvente y la fracción lipídica obtenida se almacenó en frascos ámbar a 4 °C hasta su caracterización mediante resonancia magnética nuclear (RMN).

Para minimizar la fotodegradación y la oxidación, las fracciones se conservaron en frascos de vidrio ámbar con gotero de 10 mL. La eliminación final del solvente se efectuó en un matraz de evaporación de 500 mL a una temperatura de 40 ± 5 °C. En los ensayos se incluyeron ácidos grasos comerciales (Fermont) como referencias experimentales, correspondientes a los lotes 03381, 10248 y 01501, de acuerdo con las especificaciones del proveedor. Los ácidos grasos comerciales se manipularon y almacenaron bajo las mismas condiciones que los extractos, con el propósito de evitar sesgos asociados con una exposición diferencial a la luz, la humedad o la temperatura.

Se preparó una solución de quitosano al 2,5 % (p/p) en ácido acético 0,2 M, utilizando quitosano con un grado de desacetilación del 80 % y una masa molecular de 100–300 kDa (Sigma-Aldrich). Se formularon mezclas de quitosano y ácidos grasos en las siguientes proporciones (p/p): Qs (100), Qs/palmitico (99/01), Qs/palmitico + esteárico (99/01), Qs/esteárico (99/01) y Qs/oleico (99/01). Las formulaciones se mantuvieron bajo agitación constante durante 24 h a temperatura ambiente.

La gelificación se indujo mediante reticulación física por difusión de amoníaco. Para ello, las mezclas se dividieron en alícuotas y se colocaron en recipientes herméticos, donde fueron expuestas a un exceso de hidróxido de amonio en fase de vapor durante 24 h. Posteriormente, los hidrogeles se lavaron con agua destilada hasta alcanzar un potencial de hidrógeno (pH) de 7, con el propósito de remover el acetato de amonio ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) y el hidróxido de amonio (NH_4OH) residual. Finalmente, los hidrogeles se sometieron a liofilización utilizando un equipo SCI-ENTZ -10N, bajo condiciones de -58 °C, 1 Pa y 16 h, para obtener las construcciones tridimensionales (Reyna-Urrutia et al., 2023).

Las larvas de *Spodoptera frugiperda* se recolectaron en San Nicolás Tlaminca, Texcoco, durante un período de dos semanas. Se seleccionaron individuos correspondientes a los estadios larvarios L1–L2 que no presentaran signos macroscópicos de enfermedad, tales como melanización intensa, flacidez, licuefacción, olor anómalo o baja movilidad. El transporte se efectuó en contenedores

cerrados con ventilación controlada y debidamente etiquetados con información correspondiente a la especie, fecha, localidad y etapa de desarrollo. Cuando fue posible, se implementó un sistema de doble contención. Después de la colecta, las larvas se mantuvieron bajo observación inicial durante 24–48 h para descartar individuos con mortalidad temprana o signos evidentes de infección.

Las larvas se mantuvieron en una cámara de cría bajo condiciones controladas de temperatura y fotoperíodo. Para su alimentación se utilizó una dieta artificial basada en la formulación propuesta por Burton y Perkins (1987), suministrada en recipientes cilíndricos de plástico con tapa.

Para la preparación de 250 g de dieta artificial se siguió la metodología de Burton & Perkins (1987), con una mezcla de ingredientes conforme a lo descrito por Franco Archundia et al. (2006). Las fracciones lipídicas obtenidas de *Carica papaya* se incorporaron a la dieta en las concentraciones establecidas en el diseño experimental, incluidos los niveles de referencia expresados en partes por millón (ppm). Durante la preparación se evitó el sobrecalentamiento de los aditivos termolábiles, particularmente vitaminas y conservadores, y todo el procedimiento se desarrolló bajo condiciones controladas de higiene.

La fase caliente de la preparación consistió en disolver el agar en aproximadamente entre el 60 y el 70 % del volumen total de agua y calentar la mezcla hasta alcanzar una ebullición suave, entre 90 y 100 °C. La preparación se mantuvo bajo agitación hasta obtener una mezcla transparente y sin grumos. En un recipiente separado se preparó la fase nutritiva, compuesta por harina, base proteica, levadura, azúcares y sales. Posteriormente, la fase de agar se dejó enfriar hasta alcanzar una temperatura de entre 60 y 70 °C y se incorporó gradualmente la fase nutritiva bajo agitación continua. La mezcla resultante se homogeneizó mediante un agitador mecánico durante 30–90 s.

Mientras permanecía en estado fluido, la dieta se vertió en vasos de cría o placas y se dejó gelificar a una temperatura de entre 20 y 25 °C durante 30–60 min. Durante este proceso se evitó el cierre hermético de los recipientes con el propósito de reducir la formación de condensación. La temperatura de vertido se mantuvo entre 50 y 60 °C para minimizar la degradación de los aditivos y disminuir la condensación superficial. Una vez gelificada la dieta, se dispensaron 5 mL en cada recipiente y se introdujo una larva de primer estadio en cada unidad experimental.

Cada tratamiento se realizó utilizando 20 larvas por repetición y entre cuatro y cinco repeticiones. Los recipientes se mantuvieron en una cámara de cría bajo condiciones controladas. Durante el período experimental se registró

la mortalidad y la incidencia de anomalías anatómicas en larvas y pupas, así como la presencia de deformaciones en los individuos adultos, incluidas alteraciones como alas arrugadas, siguiendo los criterios descritos por Medina-Redondo et al. (2010).

Los espectros obtenidos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de los biomateriales se adquirieron utilizando un equipo PerkinElmer Spectrum Two mediante el modo de reflectancia total atenuada (ATR). Las muestras se acondicionaron mediante desecación durante 12–24 h con sílica gel y, cuando fue necesario, se tritularon suavemente para mejorar el contacto con el cristal utilizado para la reflectancia total atenuada y reducir las interferencias ocasionadas por la presencia de agua, particularmente en las bandas próximas a 3400 y 1630 cm^{-1} . Los espectros se registraron en un intervalo de 4000–650 cm^{-1} , con una resolución de 4 cm^{-1} y 100 escaneos (Thermo Fisher Scientific, 2013).

El análisis termogravimétrico se realizó utilizando un sistema de análisis termogravimétrico y calorimetría diferencial de barrido TGA/DSC 2+ bajo una atmósfera de nitrógeno. Las mediciones se efectuaron en un intervalo de temperatura comprendido entre 25 y 600 °C, con una velocidad de calentamiento de 20 °C/min y utilizando entre 5 y 10 mg de muestra, con el propósito de mantener un equilibrio adecuado entre la resolución analítica y los posibles gradientes térmicos.

Las curvas termogravimétricas se interpretaron considerando un primer evento relacionado con la pérdida de humedad y agua ligada a temperaturas inferiores a 150 °C, un evento principal correspondiente a la degradación del polisacárido y una etapa final asociada con procesos de carbonización. Asimismo, se registró la temperatura de inicio de degradación (T_{onset}) como indicador comparativo de la estabilidad térmica de los materiales (Georgieva et al., 2012).

La adquisición de la información, el control instrumental y la evaluación de los datos se realizaron mediante los programas informáticos STARe Thermal Analysis Software y STARe Evaluation, de acuerdo con las directrices proporcionadas por el fabricante.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis mediante resonancia magnética nuclear de protón (^1H -RMN) (Figuras 1 y 2) permitió identificar señales compatibles con fracciones lipídicas ricas en cadenas alifáticas largas. Se observaron resonancias en $\delta \sim 0,85$ – $0,90$ ppm, atribuibles al grupo metilo terminal; un conjunto dominante de señales en $\delta \sim 1,20$ – $1,40$ ppm, correspondiente a los grupos metileno repetidos de la cadena ($-(\text{CH}_2)_n-$); y una señal en $\delta \sim 2,25$ – $2,35$ ppm, asignable al grupo metileno α respecto del carbonilo.

En las muestras con mayor contribución de insaturación se detectaron señales olefinicas en $\delta \sim 5,30$ – $5,40$ ppm y señales alílicas alrededor de $\delta \sim 2,0$ ppm. Adicionalmente, la presencia de señales en las regiones $\delta \sim 4,10$ – $4,50$ ppm y $\delta \sim 5,10$ – $5,30$ ppm es consistente con protones asociados con el esqueleto glicerídico, lo que sugiere que una parte de los lípidos se encuentra en forma esterificada, particularmente como acilglicéridos.

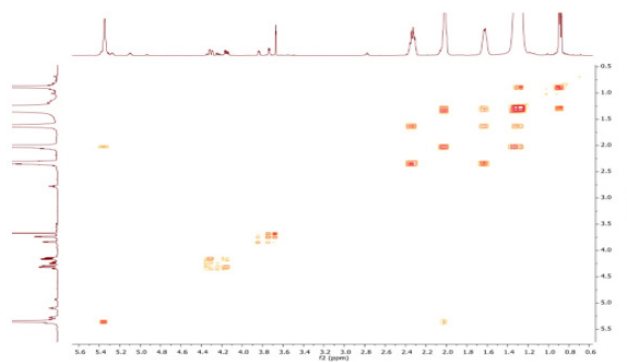


Figura 1. Espectro de correlación homonuclear (COSY) del extracto lipídico de semillas de *Carica papaya*.

El análisis mediante espectroscopía de correlación homonuclear (COSY) (Figuras 3, 4 y 5) respaldó estas asignaciones mediante la identificación de correlaciones derivadas del acoplamiento entre protones vecinos. En conjunto, los patrones espectrales observados son consistentes con los descritos previamente para extractos lipídicos obtenidos de semillas de *Carica papaya* (Franco Archundia et al., 2006).

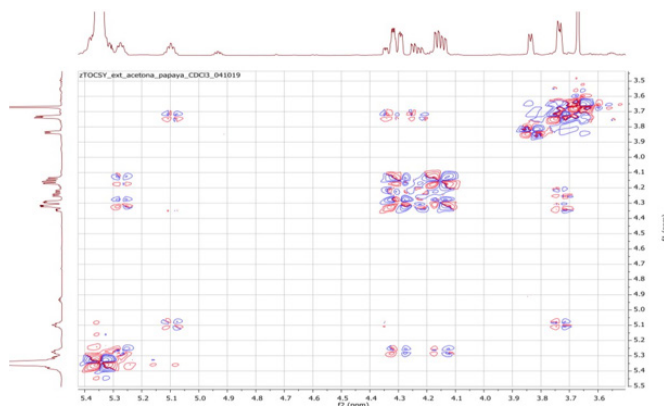


Figura 2. Espectro de correlación homonuclear (COSY) del extracto lipídico de semillas de *Carica papaya*.

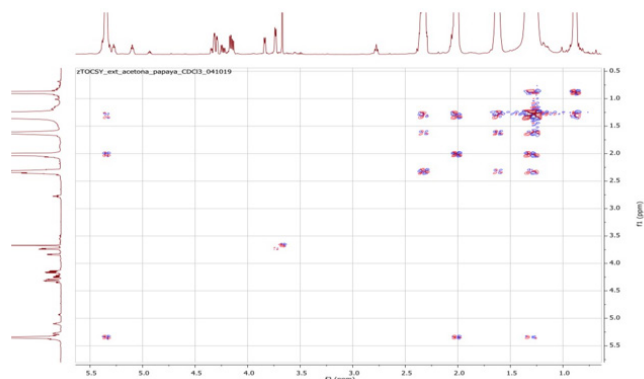


Figura 3. Espectro de correlación homonuclear (COSY) del extracto lipídico de semillas de *Carica papaya*.

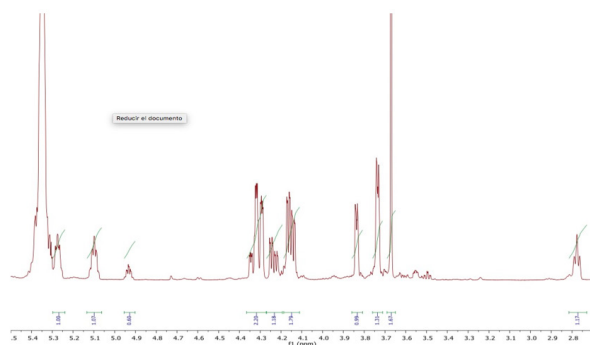


Figura 4. Espectro de resonancia magnética nuclear (RMN) del extracto lipídico de semillas de *Carica papaya*.

Tabla 1. Espectros FTIR.

δ (ppm) típico	Multiplicidad (aprox.)	Integración	Grupo/protones asignados	Atribución química / Comentario
0.85–0.90	t	3H	CH ₃ terminal (ω -CH ₃)	Presente en todos los FA; referencia útil para cuantificar cadenas
1.20–1.40	br m	(2H) _n	(CH ₂) _n cadena alifática	Señal más intensa en FA C16–C18; indica longitud/abundancia de cadena
1.55–1.65	m	2H	β -CH ₂ a carbonilo (–CH ₂ –CH ₂ –C(O)–)	Presente en FA libres y ésteres
1.95–2.10	m	4H por doble enlace	CH ₂ alílico (–CH ₂ –CH=CH–)	Diagnóstico de insaturación (oleico/linoleico/linolénico)
2.25–2.35	t	2H	α -CH ₂ a carbonilo (–CH ₂ –C(O)–)	Muy característico de FA/ésteres; buena referencia cuantitativa
2.75–2.85	m	2H por unidad bis-alílica	CH ₂ bis-alílico (–CH=CH–CH ₂ –CH=CH–)	Solo en poliinsaturados (linoleico/linolénico); no aparece en oleico
3.55–3.75	m (a veces s si solvente)	variable	–CH ₂ –OH / –CH–OH (glicerol libre o MAG) / posibles solventes	Si hay monoacilglicéridos o glicerol residual; puede solaparse con MeOH/EtOH según solvente
4.05–4.35	dd / m	4H (TAG)	glicerol sn-1/sn-3: –CH ₂ –O–C(O)R	Firma de acilglicéridos; en TAG suelen ser 4H totales (dos CH ₂ esterificados)
4.35–4.55	dd / m	2H (DAG/MAG)	glicerol –CH ₂ –O– (parcialmente esterificado)	Más evidente en DAG/MAG; puede desplazarse a campo bajo por H-bonding
5.10–5.30	m	1H (TAG/DAG)	glicerol sn-2: –CH–O–C(O)R	Señal típica del protón central del glicerol esterificado

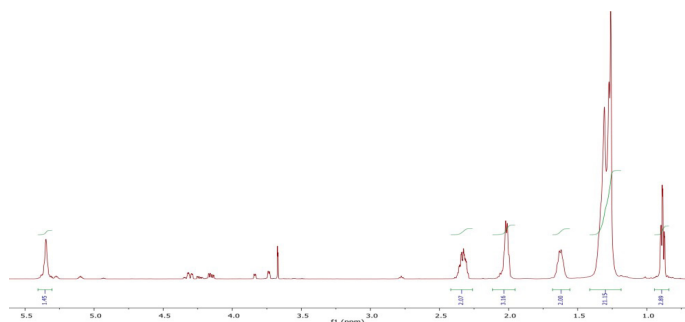


Figura 5. Resonancia magnética nuclear (RMN) del extracto de semilla de *Carica papaya*.

En la Tabla 1 se muestran los espectros obtenidos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) de las matrices tridimensionales. En todos los materiales se identificaron bandas características del quitosano, entre ellas una banda ancha en el intervalo de 3500–3300 cm^{–1}, asociada con las vibraciones de estiramiento de los grupos O–H y N–H, así como señales alrededor de 1653 cm^{–1}, correspondientes a la amida I (C=O), y de 1580 cm^{–1}, asociadas con la amida II, de acuerdo con lo reportado por Reyna-Urrutia et al. (2022).

Asimismo, se observaron bandas en 2923 y 2880 cm^{–1} asociadas con las vibraciones de estiramiento C–H de los grupos metileno, además de señales en el intervalo de 1200–1000 cm^{–1} características del esqueleto sacárido del quitosano (Bolaina-Lorenzo et al., 2017).

5.30–5.40	m	2H por doble enlace	olefínicos $-\text{CH}=\text{CH}-$	Diagnóstico directo de insaturación; esencial para relación saturados/insaturados
10.5–12.0	br s	1H	$-\text{COOH}$ (protón ácido)	Solo en FA libres; a menudo se pierde por intercambio ($\text{MeOD}/\text{D}_2\text{O}$) o no se integra bien

En las matrices funcionalizadas se registraron modificaciones espectrales consistentes con la presencia de cadenas alifáticas, entre ellas desplazamientos de las bandas correspondientes a las vibraciones C–H, de 2923 a 2913 cm^{-1} y de 2880 a 2814 cm^{-1} , así como señales atribuibles a grupos carbonilo y C–O de los ácidos grasos (Figura 6). En particular, la matriz de quitosano–ácido oleico presentó una banda intensa en 1708 cm^{-1} , asociada con la vibración de estiramiento del grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$). Asimismo, el desplazamiento de la banda de 1463 a 1494 cm^{-1} se ha relacionado con modos vibracionales en el plano asociados con el grupo O–H en sistemas que contienen ácido oleico (Ibarra et al., 2015).

En conjunto, estas modificaciones espectrales son compatibles con la incorporación de los componentes lipídicos en las matrices y con la presencia de interacciones fisicoquímicas entre el biopolímero y los ácidos grasos. Este comportamiento es consistente con lo reportado para sistemas de quitosano que incorporan fases hidrofóbicas, en los cuales las interacciones entre los componentes pueden producir modificaciones en la posición y la intensidad de determinadas bandas características (Kolesnyk et al., 2020).

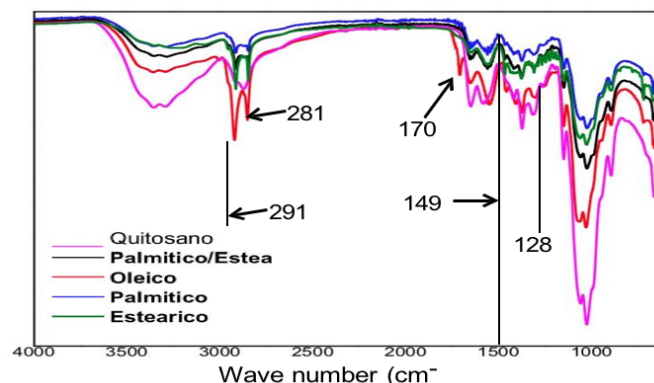


Figura 6. Espectros de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) del ácido palmítico, ácido oleico, quitosano, mezcla de ácido palmítico + ácido esteárico y ácido esteárico.

Las curvas termogravimétricas mostraron un primer evento de pérdida de masa atribuible principalmente a la eliminación de humedad y agua ligada, seguido de un segundo evento relacionado con la degradación térmica

del quitosano y la descomposición de los componentes orgánicos presentes en las matrices. En las matrices funcionalizadas se observaron variaciones en los perfiles de degradación con respecto al quitosano utilizado como referencia, evidenciadas por modificaciones en la evolución de la pérdida de masa y en las temperaturas características de los principales eventos térmicos.

Estas diferencias son compatibles con modificaciones en las interacciones intermoleculares entre el quitosano y los componentes lipídicos, así como con cambios en la organización de la fase hidrofóbica dentro de las matrices tridimensionales. La incorporación de los ácidos grasos puede modificar el entorno molecular de las cadenas del biopolímero y, en consecuencia, alterar su comportamiento frente al incremento de la temperatura. No obstante, estas variaciones deben interpretarse principalmente como evidencia de cambios en el comportamiento térmico de los materiales, sin atribuir por sí solas mecanismos específicos de interacción molecular que requieran técnicas complementarias para su confirmación (Figura 7).

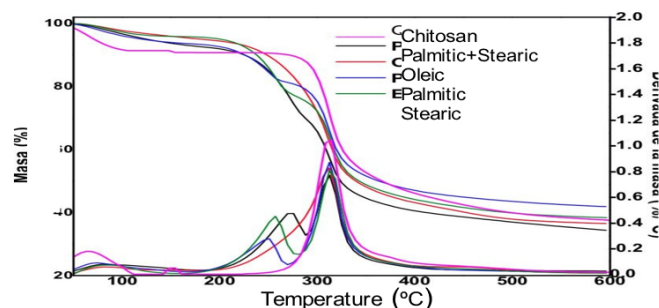


Figura 7. Análisis termogravimétrico (TGA) del quitosano, la mezcla de ácido palmítico + ácido esteárico, ácido oleico, ácido palmítico y ácido esteárico.

Los tratamientos lipídicos evaluados mostraron actividad insecticida frente a *Spodoptera frugiperda* en el intervalo experimental analizado. Se registraron mortalidades iguales o superiores al 50 % en las concentraciones de referencia, con diferencias entre los distintos compuestos y mezclas evaluados (Figuras 8, 9 y 10). Además de la mortalidad, se observaron alteraciones morfológicas durante el desarrollo, entre ellas cambios de coloración y deformaciones en larvas y pupas, así como anomalías durante la emergencia de los adultos, incluidas alas arrugadas, en concordancia con los criterios de evaluación empleados (Medina-Redondo et al., 2010).



Figura 8. Larva de *Spodoptera frugiperda* sin tratamiento.



Figura 9. Larva de *Spodoptera frugiperda* tratada con la mezcla de ácido palmítico + ácido esteárico.



Figura 10. Pupa deformada de *Spodoptera frugiperda*, con afectación dorsoventral, después del tratamiento con ácido esteárico.

El perfil obtenido mediante resonancia magnética nuclear de protón (^1H -RMN) es consistente con la presencia de un sistema lipídico en el que una proporción relevante de los ácidos grasos podría encontrarse en forma esterificada, particularmente como acilglicéridos. La región δ 4,10–4,50 ppm puede asignarse a protones diastereotópicos $-\text{CH}_2-\text{O}-\text{C}(\text{O})\text{R}$ correspondientes a las posiciones *sn*-1 y *sn*-3 del glicerol, mientras que la señal localizada alrededor de δ 5,10–5,20 ppm es compatible con el protón metínico de la posición *sn*-2 [$-\text{CH}-\text{O}-\text{C}(\text{O})\text{R}$]. En conjunto, este patrón espectral es característico de estructuras glicéricas presentes en triacilglicéridos y diacilglicéridos. La ausencia de una señal robusta e integrable correspondiente al protón del grupo carboxilo ($-\text{COOH}$) en la región δ 10,5–12,0 ppm es coherente con una contribución importante de especies esterificadas, aunque también puede estar relacionada con fenómenos

de intercambio protónico dependientes del solvente y de las condiciones utilizadas durante el análisis.

Los resultados obtenidos mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) mostraron desplazamientos de bandas, como el observado de 1463 a 1494 cm^{-1} , además de la aparición o intensificación de señales asociadas con grupos carbonilo y vibraciones C–H correspondientes a cadenas alifáticas. En conjunto, estas modificaciones espectrales respaldan la incorporación de componentes lipídicos en la matriz de quitosano. Las interacciones entre el biopolímero y las fases lipídicas pueden modificar la organización interna del material y, consecuentemente, influir en sus interacciones con el agua (Abdollahi et al., 2012; Altioik et al., 2010) y en determinadas propiedades fisicoquímicas y térmicas, como se ha observado en diferentes sistemas de quitosano que incorporan fases hidrofóbicas (Hosseini et al., 2009; Meléndez-Pastor et al., 2014).

En el plano biológico, los porcentajes de mortalidad registrados y la presencia de alteraciones morfológicas durante diferentes etapas del desarrollo son compatibles con un efecto adverso de los tratamientos lipídicos sobre *S. frugiperda*. Las deformaciones observadas en larvas y pupas, así como las anomalías detectadas durante la emergencia de los adultos, sugieren que los efectos de los tratamientos podrían extenderse más allá de la mortalidad inmediata y afectar procesos posteriores del desarrollo. Sin embargo, estos resultados deben interpretarse dentro de las condiciones experimentales evaluadas y no permiten, por sí solos, establecer un mecanismo de acción específico.

En consecuencia, la caracterización del efecto bioinsecticida requiere complementar estos hallazgos mediante curvas de dosis-respuesta que permitan establecer la relación entre concentración y mortalidad, así como determinar parámetros cuantitativos de eficacia. Asimismo, será necesario realizar evaluaciones posteriores bajo condiciones de semicampo y campo para determinar la estabilidad, persistencia y eficacia de las formulaciones en condiciones ambientales más próximas a las de aplicación agrícola. Estas etapas permitirán establecer con mayor precisión el potencial de las matrices funcionalizadas con componentes lipídicos como alternativa para el manejo de *S. frugiperda*.

CONCLUSIONES

El estudio concluye que los espectros obtenidos mediante resonancia magnética nuclear de protón (^1H -RMN) mostraron señales diagnósticas compatibles con fracciones lipídicas constituidas por cadenas largas de ácidos grasos. Se identificaron resonancias características de insaturación, incluidos protones olefínicos alrededor de δ ~5,30 ppm ($-\text{CH}=\text{CH}-$) y protones alílicos alrededor de δ

~2,00 ppm ($-\text{CH}_2-\text{CH}=\text{CH}-$), además de señales intensas en δ ~1,20–1,40 ppm atribuibles a los grupos metileno de las cadenas alifáticas ($-(\text{CH}_2)_n-$) y una señal alrededor de δ ~0,88 ppm correspondiente al grupo metilo terminal ($-\text{CH}_3$). Asimismo, se detectó una señal próxima a δ ~2,30 ppm asociada con el grupo metileno α respecto del carbonilo ($-\text{CH}_2-\text{C}(\text{O})\text{O}-$), lo que respalda la presencia de fragmentos acilo característicos de ácidos grasos.

Las señales observadas en las regiones δ ~4,10–4,40 ppm y δ ~5,10 ppm son compatibles con protones del esqueleto glicerídico y respaldan la presencia de especies lipídicas esterificadas, particularmente acilglicéridos. En conjunto, las diferencias observadas entre los perfiles espectrales indican variaciones en la composición relativa de las fracciones lipídicas analizadas, tanto en la contribución de estructuras glicerídicas como en el grado de saturación e insaturación de las cadenas de ácidos grasos. Estos resultados confirman la utilidad de la resonancia magnética nuclear de protón para caracterizar cualitativamente la composición estructural de los extractos lipídicos obtenidos de semillas de *Carica papaya*.

La caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y análisis termogravimétrico proporcionó evidencia compatible con la incorporación de los ácidos grasos en las matrices tridimensionales de quitosano. Las modificaciones observadas en las bandas características de los grupos funcionales y en los perfiles de degradación térmica indican cambios en las propiedades fisicoquímicas de los materiales después de su funcionalización. Estos resultados respaldan el potencial de las matrices de quitosano como sistemas para la incorporación y vehiculización de componentes lipídicos, aunque la demostración de propiedades específicas de liberación controlada requiere estudios cinéticos adicionales.

Los ácidos grasos evaluados mostraron actividad bioinsecticida frente a larvas de *Spodoptera frugiperda*, con mortalidades iguales o superiores al 50 % en las concentraciones de referencia estudiadas. Además de la mortalidad, se observaron alteraciones morfológicas durante diferentes etapas del desarrollo, incluidas deformaciones larvales y pupales y anomalías durante la emergencia de los adultos. Estos hallazgos sugieren que los efectos biológicos de los tratamientos pueden extenderse más allá de la mortalidad inmediata e interferir en procesos asociados con el desarrollo y la transición entre estadios del insecto.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian el potencial de los componentes lipídicos derivados de semillas de *Carica papaya* y de su incorporación en matrices tridimensionales de quitosano para el desarrollo de alternativas bioinsecticidas frente a *Spodoptera frugiperda*. No obstante, la determinación de su eficacia y aplicabilidad

agronómica requiere complementar estos hallazgos mediante análisis cuantitativos completos de respuesta dosis–efecto, caracterización de los mecanismos de acción, evaluación de la liberación de los compuestos activos y ensayos bajo condiciones de semicampo y campo. Estos estudios permitirán establecer la estabilidad, persistencia, seguridad y eficacia de las formulaciones en condiciones ambientales representativas de su posible utilización agrícola.

REFERENCIAS

- Abdollahi, F., Niknam, V., Ghanati, F., Masroor, F., & Noorbakhsh, S. N. (2012). Biological effects of weak electromagnetic field on healthy and phytoplasma infected lime trees (*Citrus aurantifolia*). *The Scientific World Journal*, 2012, 1–6. <https://doi.org/10.1100/2012/716929>
- Altioek, D., Altioek, E., & Tihminlioglu, F. (2010). Physical, antibacterial and antioxidant properties of chitosan films incorporated with thyme oil for potential wound healing applications. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 21(7), 2227–2236. <https://doi.org/10.1007/s10856-010-4065-x>
- Bermúdez-Torres, K., Martínez-Herrera, J., Figueroa-Brito, R., Wink, M., & Legal, L. (2009). Quinolizidine alkaloid activity from three Mexican *Lupinus* against the lepidopteran crop pest *Spodoptera frugiperda*. *BioControl*, 54(3), 459–466. <https://doi.org/10.1007/s10526-008-9180-y>
- Bolaina-Lorenzo, E., Martínez-Ramos, C., Monleón-Pradas, M., Herrera-Kao, W., Cauich-Rodríguez, J. V., & Cervantes-Uc, J. M. (2017). Electrospun polycaprolactone/chitosan scaffolds for nerve tissue engineering: Physicochemical characterization and Schwann cell biocompatibility. *Biomedical Materials*, 12(1), 015008. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/12/1/015008>
- Brazelle, W., Kreahling, J. M., Gemmer, J., Ma, Y., Cress, W. D., Haura, E., & Altioek, S. (2010). Histone deacetylase inhibitors downregulate checkpoint kinase 1 expression to induce cell death in non-small cell lung cancer cells. *PLoS ONE*, 5(12), e14335. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014335>
- Burton, L. R., & Perkins, D. (1987). Rearing the corn earworm and fall armyworm for resistance studies to corn. *Proceedings of the International Symposium on Methodologies for Developing Host Plant Resistance to Maize Insects* (pp. 35–37). CIMMYT.
- Franco Archundia, S. L., Jiménez Pérez, A., Luna León, C., & Figueroa Brito, R. (2006). Efecto tóxico de semillas de cuatro variedades de *Carica papaya* (Caricaceae) en *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Folia Entomológica Mexicana*, 45(2), 171–177. <https://www.redalyc.org/pdf/424/42445208.pdf>

- Georgieva, V., Zvezdova, D., & Vlaev, L. (2012). Non-isothermal kinetics of thermal degradation of chitosan. *Chemistry Central journal*, 6(1), 81. <https://doi.org/10.1186/1752-153X-6-81>
- Hosseini, N. M., Palta, J. A., Berger, J. D., & Siddique, K. H. M. (2009). Soil water content effects on chickpea (*Cicer arietinum* L.): Seedling emergence and early growth interaction with genotype and seed size. *Agricultural Water Management*, 96(12), 1732–1736. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.07.010>
- Ibarra, J., Melendres, J., Almada, M., Burboa, M. G., Taboada, P., Juárez, J., & Valdez, M. A. (2015). Synthesis and characterization of magnetite/PLGA/chitosan nanoparticles. *Materials Research Express*, 2(9), 095010. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/2/9/095010>
- Kolesnyk, I., Konovalova, V., Kharchenko, K., Burban, A., Kujawa, J., & Kujawski, W. (2020). Improved transport and antifouling properties of polyethersulfone membranes modified with α -amylase incorporated in chitosan-based polymeric micelles. *Journal of Membrane Science*, 595, 117605. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117605>
- Madera-Santana, T. J., Toledo-López, V. M., Martínez-Robison, K., Rejón-Moo, V., & Fortiz Hernández, J. (2022). Evaluación de películas comestibles de quitosano, agar y tomillo para mantener la calidad de frutos de aguacate “Hass” durante su almacenamiento. *Biotechnia*, 25(1), 116–125. <https://doi.org/10.18633/biotechnia.v25i1.1728>
- Medina, P., Smagghe, G., Budia, F., Tirry, L., & Viñuela, E. (2003). Toxicity and absorption of azadirachtin, diflubenzuron, pyriproxyfen and tebufenozide after topical application in predatory larvae of *Chrysoperla carnea* (Neuroptera: Chrysopidae). *Environmental Entomology*, 32(1), 196–203. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-32.1.196>
- Medina-Redondo, M., Arnáiz-Pita, Y., Clavaud, C., Fontaine, T., del Rey, F., Latgé, J. P., & Vázquez de Aldana, C. R. (2010). $\beta(1,3)$ -glucanase activity is essential for cell wall integrity and viability of *Schizosaccharomyces pombe*. *PLoS ONE*, 5(11), e14046. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014046>
- Meléndez-Pastor, I., Hernández, E. I., Navarro-Pedreño, J., & Gómez, I. (2014). Socioeconomic factors influencing land cover changes in rural areas: The case of the Sierra de Albarracín (Spain). *Applied*
- Reyna-Urrutia, V. A., Estévez, M., González-González, A. M., & Rosales-Ibáñez, R. (2022). 3D scaffolds of caprolactone/chitosan/poly(vinyl alcohol)/hydroxyapatite stabilized by physical crosslinking seeded with porcine dental pulp stem cells for bone tissue engineering. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 33(12), 81. <https://doi.org/10.1007/s10856-022-06702-2>
- Reyna-Urrutia, V. A., Rosales-Ibáñez, R., González-González, A. M., Estevez, M., Rodríguez-Martínez, J. J., & González-Reyna, M. (2023). Biological activity of a chitosan-carboxymethylcellulose-zinc oxide and calcium carbonate in 3D scaffolds stabilized by physical links for bone tissue engineering. *Journal of Biomaterials Applications*, 37(10), 1776–1788. <https://doi.org/10.1177/08853282231168239>
- Santana, L. F., do Espírito Santo, B. L. S., Tatara, M. B., Negrão, F. J., Croda, J., Alves, F. M., de Oliveira Filiú, W. F., Cavaleiro, L. F., Nazário, C. E. D., Asato, M. A., de Faria, B. B., do Nascimento, V. A., de Cássia Avelaneda Guimarães, R., de Cássia Freitas, K., & Hiane, P. A. (2022). Effects of the Seed Oil of *Carica papaya* Linn on Food Consumption, Adiposity, Metabolic and Inflammatory Profile of Mice Using Hyperlipidic Diet. *Molecules* (Basel, Switzerland), 27(19), 6705. <https://doi.org/10.3390/molecules27196705>
- Zavala-Sánchez, M. Á., Rodríguez-Chávez, J. L., Figueroa-Brito, R., Quintana-López, C. M., Bah, M. M., Campos-Guillén, J., Bustos-Martínez, J. A., Zamora-Avella, D., & Ramos-López, M. A. (2020). Bioactivity of 1-oc-tacosanol from *Senna crotalarioides* (Fabaceae: Caesalpinioideae) to control *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). *Florida Entomologist*, 102(4), 731–737. <https://doi.org/10.1653/024.102.0410>

Conflictos de interés:

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Contribución de los autores:

Daniel Olea-Casillas, Victor Reyna-Urrutia: Concepción y diseño del estudio, adquisición de datos, análisis e interpretación, redacción del manuscrito, revisión crítica del contenido, análisis estadístico, supervisión general del estudio.

Declaración ética:

El estudio se realizó con *Spodoptera frugiperda* y no involucró seres humanos ni animales vertebrados. Los bioensayos se desarrollaron bajo condiciones controladas de laboratorio y conforme a buenas prácticas de investigación y manejo responsable de organismos experimentales.