

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE  
INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO



Evaluación de la Mortalidad de *Tribolium castaneum* Expuestos a Insecticidas  
Piretroides y Organofosforados Potenciados con Nanopartículas de Grafito

Por:

**ERUBIEL SANCHEZ DOMINGUEZ**

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

**INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO**

Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México  
Junio 2026

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO  
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA  
PROGRAMA DOCENTE DE LA CARRERA DE  
INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO

Evaluación de la Mortalidad de *Tribolium castaneum* Expuestos a Insecticidas  
Piretroides y Organofosforados Potenciados con Nanopartículas de Grafito

Por:


**ERUBIEL SANCHEZ DOMINGUEZ**


TESIS


Presentada como requisito parcial para obtener el título de:


**INGENIERO AGRÓNOMO PARASITÓLOGO**


Aprobada por el Comité Asesor:

  
DR. ERNESTO CERNA CHAVEZ  
Asesor Principal

  
DR. ALBERTO ROQUE ENRIQUEZ  
Asesor Principal Externo

  
DRA. YISA MARIA OCHOA FUENTES  
Coasesor

  
DRA. JAZMIN JANET VELAZQUEZ GUERRERO  
Coasesor

  
DR ALBERTO SANDOVAL RANGEL  
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila de Zaragoza, México  
Junio 2026

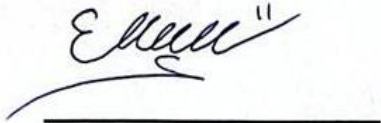
## DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Todo material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor de los Estados Unidos Mexicanos, y pertenece al autor principal quien es el responsable directo y jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, gráficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente. Así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Por lo anterior, nos responsabilizamos de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaramos que este trabajo no ha sido previamente presentado en ninguna otra institución educativa, organización, medio público o privado.

Autor principal



Erubiel Sánchez Domínguez

Asesor principal



Dr. Ernesto Cerna Chávez

## **AGRADECIMIENTOS**

Estoy seguro de que las personas que nos rodean influyen en quienes somos y en quienes nos convertimos, quiero agradecer especialmente a:

Dios por darme la fortaleza de seguir adelante, guiarme en el camino de hacer las cosas bien y no detenerme hasta lograrlo, siendo cada día una bendición.

Mi madre Sofía Domínguez Cuellar una mujer trabajadora, noble, amable, siendo mi motivo por el cual me encuentro finalizando mi carrera, dándolo todo por la familia, por bríndame tanto amor y apoyo cuando más lo necesitaba, siempre con la fe en Dios.

Mi padre Erubiel Sánchez Vergara, por enseñarme la vida del campo, por sus buenos consejos, apasionado en lo que hace, apoyándome cuando lo necesito, una inspiración por todo lo que ha logrado.

A mis hermanos Adalit, Emiliano y Samir por recorrer este camino juntos, por todos los momentos que hemos vivido, risas, peleas, todas las anécdotas que tenemos y las que faltan, me llenan de orgullo, espero ser su ejemplo y apoyarlos cuando lo necesiten.

A mi Alma Terra Mater la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que fue mi segunda casa literalmente, tantos recuerdos inolvidables que viví, muchas experiencias que me llevare en mi corazón.

A mi asesor al Dr. Ernesto Cerna Chávez por darme la confianza de realizar este proyecto y los conocimientos que aprendí de él, al Dr. Alberto Roque Enriquez por la paciencia que me tuvo, por su apoyo, dedicación y por compartir sus conocimientos conmigo, estoy infinitamente agradecido, así como a la Dra. Rocío de Jesús Díaz Aguilar, a la Dra. Jazmín Janet Velázquez Guerrero y a la Dra. Yisa María Ochoa Fuentes.

A mi familia, primos y tíos, especialmente a mi tío Juan Carlos, por sus buenos consejos, por los buenos momentos que viví en mi infancia y una inspiración como ingeniero y a mis primos Gael y Zaid grandes personas que siempre nos hemos mantenido en contacto y seguimos creciendo como personas siempre viviendo los buenos momentos.

A mis amigos, Carlos, Jael, Luis y a todos aquellos con los que viví buenos momentos en esta universidad y afuera de ella, ustedes saben quiénes son, que me ayudaron aprender, que me ayudaron a crecer como persona, que estuvieron ahí en las buenas y en las malas, todos los momentos especiales que viví los llevare siempre conmigo.

A los amigos de Club Hípico Agua Nueva que me apoyaron en solventar mis gastos para mis estudios con trabajo, siempre muy amigables y pasando buenos momentos.

Y a todas las personas que compartieron momentos en mi vida.

## DEDICATORIA

### **A Dios.**

Por permitirme llegar a este momento tan especial en mi vida, por los triunfos y los momentos difíciles que permiten acercarte más a ti.

### **A ti Madre.**

Sofía Domínguez Cuellar, por haberme educado y soportar mis errores, gracias a tus consejos, por el amor que siempre me has brindado, por cultivar e inculcar ese sabio don de la responsabilidad.

### **A ti Padre.**

Erubiel Sánchez Vergara a quien le debo todo en la vida, le agradezco el cariño, la comprensión, la paciencia y el apoyo que me brindó para culminar mi carrera profesional.

### **A mis Hermanos.**

Por qué siempre he contado con ellos para todo, gracias a la confianza que siempre nos hemos tenido, por todo el apoyo y la amistad.

### **A mis Familiares.**

Gracias a todos que directamente me impulsaron para llegar hasta este lugar, a todos mis familiares que me resulta muy difícil poder nombrarlos en tan poco espacio, sin embargo, ustedes saben quiénes son.

### **A mis maestros.**

Gracias por su tiempo, por su apoyo, así como, por la sabiduría que me transmitieron en el desarrollo de mi formación profesional, en especial.

### **A mis amigos.**

Que hemos podido llegar hasta el final del camino y que, hasta el momento, seguimos siendo amigos, por todos los momentos vividos.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	ix
<b>DEDICATORIA</b> .....	xi
<b>LISTA DE CUADROS</b> .....	viii
<b>1. RESUMEN</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>2. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2.1 Objetivo general</b> .....	3
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	3
<b>2.3 Hipótesis</b> .....	3
<b>3. REVISION DE LITERATURA</b> .....	4
<b>3.1 Importancia de granos almacenados</b> .....	4
<b>3.2 Producción nacional del maíz</b> .....	5
<b>3.3 Granos almacenados en México</b> .....	6
<b>3.4 Daños ocasionados a los granos almacenados</b> .....	6
<b>3.5 Pérdidas de granos almacenados</b> .....	7
<b>3.6 Importancia de insectos plaga de los granos almacenados</b> .....	8
3.6.1 Plagas secundarias.....	9
<b>3.7 Gorgojo Castaño de la harina <i>T. castaneum</i> Herberst</b> .....	10
3.7.1 Clasificación taxonómica.....	10
3.7.2 Morfología.....	11
3.7.3 Biología y ciclo de vida.....	12
3.7.4 Tipos de daños de <i>T. castaneum</i> .....	13
<b>3.8 Métodos de control</b> .....	13
<b>3.9 Bifentrina</b> .....	14
<b>4 Lambda cyalotrina</b> .....	15
<b>4.1 Dimetoato</b> .....	17
<b>4.2 Nanotecnología</b> .....	18
4.2.1 Nanoformulaciones.....	18
<b>4.3 Clasificación de nanoformulaciones</b> .....	19
4.3.1 Nanoportadores Orgánicos.....	19
4.3.2 Nanoportadores Inorgánicos.....	19
4.3.3 Nanoportadores Basados en Carbono.....	20

<b>4.4 NPsGr</b> .....	20
4.4.1 Modos de acción de NPsGr.....	20
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	22
<b>5.1 Ubicación del experimento</b> .....	22
<b>5.2 Obtención y mantenimiento de colonias</b> .....	22
<b>5.3 Establecimiento de bioensayo</b> .....	22
<b>5.4 Criterio de mortalidad o evaluación</b> .....	22
<b>5.5 Análisis estadístico</b> .....	23
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	24
<b>7. CONCLUSIÓN</b> .....	30
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	31

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Mortalidad evaluada a las 72 h de <i>T. castaneum</i> expuesto a bifentrina en combinación con NPsGr.....	24
<b>Cuadro 2.</b> Mortalidad evaluada a las 72 h de <i>T. castaneum</i> expuesto a lambda cialotrina en combinación con NPsGr. ....	25
<b>Cuadro 3.</b> Mortalidad evaluada a las 72 h de <i>T. castaneum</i> expuesto a dimetoato cialotrina en combinación con NPsGr.....	26
<b>Cuadro 4.</b> Dosis letal en <i>T. castaneum</i> en diferentes concentraciones de NPsGr y bifentrina a las 72 h. ....	27
<b>Cuadro 5.</b> Dosis letal en <i>T. castaneum</i> en diferentes concentraciones de NPsGr y lambda cialotrina a las 72 h. ....	28
<b>Cuadro 6.</b> Dosis letal en <i>T. castaneum</i> en diferentes concentraciones de NPsGr y dimetoato a las 72 h. ....	29

## 1. RESUMEN

El insecto *Tribolium castaneum* (*T. castaneum*) representa una de las plagas secundarias de mayor relevancia en los granos almacenados en México, cuyo control se realiza principalmente mediante el uso de insecticidas químicos. En la actualidad, el sector agrícola demanda optimizar la eficiencia de estos compuestos, procurando maximizar su efectividad y reducir su impacto ambiental. Este proyecto presenta un estudio detallado sobre la protección de granos almacenados, enfocándose en la evaluación de nuevas estrategias para combatir al gorgojo castaño de la harina *T. castaneum*. La investigación parte de la necesidad crítica de reducir las pérdidas postcosecha, las cuales afectan la seguridad alimentaria y generan importantes desafíos económicos a nivel global. La fase experimental se centró en evaluar el efecto sinérgico de combinar nanopartículas de grafito (NPsGr) con dos grupos de insecticidas ampliamente utilizados: piretroides (bifentrina y lambda cialotrina) y organofosforados (dimetoato). Los resultados obtenidos demuestran que la integración de NPsGr potencia significativamente la toxicidad de ambos compuestos, logrando altas tasas de mortalidad en un periodo de 72 horas, en el cual bifentrina mostró una mortalidad de 84.44 %, a 4000 ppm al 10 % de NPsGr, lambda cialotrina 63.33 % y dimetoato con 95.55 %. Para la concentración letal media bifentrina, lambda cialotrina y dimetoato presentaron una  $CL_{50}$  de 757.59, 3504, 55.87 ppm respectivamente, presentando una relación de sinergia de 15.88, 24.57, 2.1 veces más respectivamente, reduciendo de manera eficaz la dosis de aplicación.

**Palabras clave:** Nanopartículas, potencia, granos, gorgojo, toxicidad.

## ABSTRACT

The chestnut weevil (*Tribolium castaneum*) is one of the most significant secondary pests of stored grains in Mexico, and its control is primarily achieved through the use of chemical insecticides. Currently, the agricultural sector is demanding improvements in the efficiency of these compounds, seeking to maximize their effectiveness and reduce their environmental impact. This project presents a detailed study on the protection of stored grains, focusing on the evaluation of new strategies to combat the chestnut weevil, *T. castaneum*. The research stems from the critical need to reduce post-harvest losses, which affect food security and generate significant economic challenges globally. The experimental phase focused on evaluating the synergistic effect of combining graphite nanoparticles (GrNPs) with two groups of widely used insecticides: pyrethroids (bifenthrin and lambda cyhalothrin) and organophosphates (dimethoate). The results obtained demonstrate that the integration of NPsGr significantly enhances the toxicity of both compounds, achieving high mortality rates within a 72-hour period. Bifenthrin showed a mortality rate of 84.44% at 4000 ppm with 10% NPsGr, lambda-cyhalothrin 63.33%, and dimethoate 95.55%. For the median lethal concentration (LC50), bifenthrin, lambda-cyhalothrin, and dimethoate presented LC50 values of 757.59, 3504, and 55.87 ppm, respectively, exhibiting a synergy ratio of 15.88, 24.57, and 2.1 times, respectively, effectively reducing the application dose.

**Keywords:** Nanoparticles, potency, grains, weevil, toxicity.

## 2. INTRODUCCIÓN

La importancia de granos almacenados radica en su papel fundamental como pilar de la seguridad alimentaria mundial y en su contribución esencial a la economía agrícola, dando sustento básico a una gran proporción de la población global (Haroun *et al.*, 2023). La producción actual de granos almacenados a nivel mundial alcanza cerca de 2.800 millones de toneladas al año, según datos recientes de la FAO, lo que resalta su papel en la estabilidad económica global y el suministro constante de alimentos (Erenstein *et al.*, 2022; Khoruzhy *et al.*, 2022).

Almacenar granos actúa como un mecanismo de regulación del mercado, ya que permite a los gobiernos y entidades privadas absorber excedentes durante la cosecha para evitar que los precios caigan drásticamente, y liberar granos cuando hay escasez para prevenir picos de precios (Barahona *et al.*, 2017, Kooten *et al.*, 2019). Un almacenamiento adecuado permite a los agricultores vender sus productos en momentos de mayor demanda en lugar de verse obligados a vender inmediatamente después de la cosecha a precios bajos (Tadesse, 2020).

Uno de los principales daños que suceden si el grano no es consumido en su totalidad, su valor comercial puede caer a cero debido a daños cualitativos; El maíz representa un desafío constante, ya que el país enfrenta condiciones climáticas variables que favorecen la proliferación de plagas en almacenes rurales y centros de acopio tecnificados (Shiferaw *et al.*, 2011).

Se estima que más de 1,000 especies de insectos, principalmente de los órdenes Coleóptera y Lepidóptera, son responsables de pérdidas que varían en países desarrollados (Wakil *et al.*, 2022). Asimismo, las infestaciones por insectos provocan pérdidas nutricionales selectivas que superan la simple reducción de peso, dado que especies como *Prostephanus truncatus* y *Callosobruchus maculatus* priorizan el consumo del germen y endospermo ricos en proteínas, grasas, hierro y zinc en maíz y frijol, agravando la desnutrición en poblaciones vulnerables de países en desarrollo (Stathats *et al.*, 2023). Este impacto

diferencial en los componentes nutricionales del grano acentúa la problemática de seguridad alimentaria, al reducir no solo la cantidad sino también la calidad de los alimentos disponibles (Shiferaw *et al.*, 2011).

En este sentido, un ejemplo es el gorgojo castaño de la harina *T. castaneum*, clasificado como plaga secundaria que se beneficia directamente de la acción de especies primarias como *Sitophilus* spp., ya que el daño inicial en los granos intactos y residuos generado incrementan su atractivo olfativo y favorecen el crecimiento poblacional al proporcionar sustratos accesibles como granos rotos, polvo y residuos (Rigopoulou *et al.*, 2023; Shah *et al.*, 2020; Winkle *et al.*, 2021).

Con una población mundial que se espera alcance los 9,800 millones de personas en 2050, es importante enfocarnos en la reducción de las pérdidas causadas por insectos; Mejorar la protección de los granos almacenados tiene un impacto más inmediato y sostenible en la disponibilidad de alimentos que los esfuerzos por aumentar la producción, ya que asegura que los recursos ya invertidos (agua, tierra y trabajo) no se desperdicien (Abdelsamea *et al.*, 2023).

## **2.1 Objetivo general**

Evaluar la eficacia de ingredientes activos químicos, potenciados con nanopartículas de grafito sobre la mortalidad de *Tribolium castaneum* bajo condiciones controladas de laboratorio.

## **2.2 Objetivos específicos**

- Evaluar el efecto sinérgico de la combinación de nanopartículas de grafito con los ingredientes activos bifentrina, dimetoato y lambda cialotrina sobre la mortalidad del insecto *T. castaneum*.
- Determinar la concentración letal media (CL<sub>50</sub>) de las nano formulaciones en la mortalidad del insecto *T. castaneum*.

## **2.3 Hipótesis**

Se espera que al menos unos los insecticidas combinados con nanopartículas de grafito, incremente la mortalidad de *T. castaneum*.

### 3. REVISION DE LITERATURA

#### 3.1 Importancia de granos almacenados

La importancia de granos almacenados radica en su papel fundamental como pilar de la seguridad alimentaria mundial y en su contribución esencial a la economía agrícola, dando sustento básico a una gran proporción de la población global (Haroun *et al.*, 2023). Los cultivos emblemáticos como el maíz, el trigo y el arroz representan la base de una dieta a más de 4.5 mil millones de personas, aportando cerca del 45 % de las calorías y el 40 % de las proteínas consumidas globalmente, lo que refuerza su rol indispensable en la nutrición humana y la estabilidad alimentaria (Chen *et al.*, 2022; Langridge *et al.* 2022).

La producción actual de granos almacenados a nivel mundial alcanza cerca de 2.800 millones de toneladas al año, según datos recientes de la FAO, lo que resalta su papel en la estabilidad económica global y el suministro constante de alimentos (Erenstein *et al.*, 2022; Khoruzhy *et al.*, 2022).

Su capacidad de ser almacenados por largos periodos los hace superiores a otros alimentos básicos como carnes, vegetales o tubérculos, los cuales son altamente perecederos; además, el grano es ampliamente utilizado en la industria alimenticia (panadería, pastas, entre otros) y como forraje para ganado, consolidando su importancia en la seguridad alimentaria global (Chen *et al.*, 2022).

El almacenamiento permite mantener reservas disponibles durante las épocas del año en las que no hay cosecha, garantizando un suministro continuo de alimentos y preservando su calidad frente a deterioro por respiración, insectos y microorganismos (Kusuma y Jamaludin, 2022).

Almacenar granos actúa como un mecanismo de regulación del mercado, ya que permite a los gobiernos y entidades privadas absorber excedentes durante la cosecha para evitar que los precios caigan drásticamente, y liberar granos cuando hay escasez para prevenir picos de precios (Barahona *et al.*, 2017, Kooten *et al.*, 2019). Un almacenamiento adecuado permite a los agricultores vender sus productos en momentos de mayor demanda en lugar de verse obligados a vender inmediatamente después de la cosecha a precios bajos (Tadesse, 2020).

Sin embargo, la conservación de estos productos se enfrenta a desafíos significativos, principalmente las pérdidas postcosecha causadas por la infestación de plagas de insectos (Shamiana y Grace., 2021).

### **3.2 Producción nacional del maíz**

La producción de granos en México está altamente concentrada en regiones específicas, los principales estados son; Jalisco como líder nacional en producción de maíz, aportando aproximadamente 3.8 millones lo que representa el 16 % del volumen total del país, Sinaloa es el segundo productor con una producción de 3.3 millones, lo que representa un 14 % de la participación nacional en maíz; Otros estados clave son Michoacán cerca de 2.1 millones de toneladas (9 %), Guanajuato con una producción aproximada de 1.8 millones de toneladas (7 %) y el Estado de México con 1.7 millones de toneladas (7 %), son fundamentales para el suministro nacional (SIAP, 2026).

El maíz es el grano más predominante, representando el 74 % del total cosechado aproximadamente 27.2 millones de toneladas (Pérez Robles *et al.*, 2022). Constituyendo el 88.3 % de la producción nacional de granos en términos de importancia relativa por consumo (Castañeda y Cervantes, 2022). A pesar de estos porcentajes, México enfrenta un déficit en la producción de maíz para satisfacer su demanda nacional (estimada en 33.1 millones de toneladas), lo que obliga a realizar importaciones masivas (Romero *et al.*, 2019).

### **3.3 Granos almacenados en México**

Uno de los principales problemas en los granos de almacenamiento son los insectos responsables de una degradación significativa de la producción de alimentos en todo el mundo (Cartaxo *et al.*, 2020).

En México los granos básicos como maíz, frijol, trigo y arroz representan la base de la alimentación y tienen un papel central en la seguridad alimentaria nacional; El maíz siendo uno de los cultivos más emblemático y de mayor porcentaje, los datos clave sobre producción, distribución geográfica y pérdidas ya que el maíz forma parte esencial de la dieta diaria de la población: Según datos (ciclo 2021 2022), la producción total de los principales granos en México alcanzo aproximadamente 34.6 millones de toneladas (Cuero,2025).

El fortalecimiento de la infraestructura de almacenamiento como el uso de silos metálicos y el control eficiente de plagas son medidas críticas para reducir estas pérdidas y mejorar la seguridad alimentaria en el país (Bokusheva *et al.*, 2012).

### **3.4 Daños ocasionados a los granos almacenados**

Uno de los principales daños que suceden si el grano no es consumido en su totalidad, su valor comercial puede caer a cero debido a daños cualitativos; El maíz representa un desafío constante, ya que el país enfrenta condiciones climáticas variables que favorecen la proliferación de plagas en almacenes rurales y centros de acopio tecnificados (Shiferaw *et al.*, 2011). Los daños cualitativos al maíz y otros granos básicos se manifiestan a través de la degradación de las propiedades organolépticas y la proliferación de metabolitos fúngicos derivados del incremento de temperatura en el granel (Aroca *et al.*, 2023; Gindaba *et al.*, 2024).

Asimismo, la actividad metabólica de los insectos genera incrementos localizados de temperatura y humedad en la masa de granos, lo que crea un microambiente favorable para el desarrollo fúngico acelerado y la producción de micotoxinas perjudiciales para la salud humana y animal (Riudavets *et al.*, 2018). Estas contaminaciones biológicas, junto con la reducción de la calidad y el valor

nutricional del grano, conllevan a un deterioro significativo que puede hacer que el producto sea inviable para el consumo o comercialización (Ferraris *et al.*, 2021).

Con una población mundial que se espera alcance los 9,800 millones de personas en 2050, la reducción de las pérdidas causadas por insectos es vital; Mejorar la protección de los granos almacenados tiene un impacto más inmediato y sostenible en la disponibilidad de alimentos que los esfuerzos por aumentar la producción, ya que asegura que los recursos ya invertidos agua, tierra y trabajo no se desperdicien (Abdelsamea *et al.*, 2023).

Asimismo, las infestaciones por insectos provocan pérdidas nutricionales selectivas que superan la simple reducción de peso, dado que especies como *Prostephanus truncatus* y *Callosobruchus maculatus* priorizan el consumo del germen y endospermo ricos en proteínas, grasas, hierro y zinc en maíz y frijol, agravando la desnutrición en poblaciones vulnerables de países en desarrollo (Stathats *et al.*, 2023) Este impacto diferencial en los componentes nutricionales del grano acentúa la problemática de seguridad alimentaria, al reducir no solo la cantidad sino también la calidad de los alimentos disponibles (Shiferaw *et al.*, 2011).

### **3.5 Pérdidas de granos almacenados**

La pérdida de granos almacenados se estima entre el 5 % y 30 % de los granos producidos, se pierden después de la cosecha debido a un manejo y almacenamiento deficientes (Ávila *et al.*, 2016). Estas pérdidas no solo representan un desperdicio de alimento, sino también una pérdida masiva de recursos invertidos (Gitonga *et al.*, 2015). Impactando directamente a la disponibilidad de productos agrícolas para el consumo humano y animal, así como para la industria (Davyt *et al.*, 2019).

Dichas pérdidas pueden acentuarse en regiones con infraestructura de almacenamiento deficiente, donde el 95 % de los desperdicios se generan en hogares y pequeños comercios, mientras que solo el 5 % ocurre en etapas de producción y procesamiento industrial (Pino-Benítez *et al.*, 2024). Estas

reducciones en la masa del grano no solo disminuyen el volumen comercializable, sino que también merman la capacidad de los agricultores y comerciantes para obtener ingresos justos (Solà *et al.*, 2017).

Nutricionalmente se observa una reducción significativa en el contenido de carbohidratos totales y fibra, lo que disminuye el valor calórico del alimento (Badran *et al.*, 2025). Adicionalmente, se registra una reducción en el contenido de proteínas y lípidos, lo que afecta directamente la calidad nutricional y el perfil organoléptico del grano (Parajuli *et al.*, 2022).

### **3.6 Importancia de insectos plaga de los granos almacenados**

La importancia de las plagas de granos almacenados radica en su capacidad para provocar una degradación masiva de las reservas alimentarias, con impactos económicos que superan los 100,000 millones de dólares anuales a nivel mundial (Bandani, 2012).

Se estima que más de 1,000 especies de insectos, principalmente de los órdenes Coleóptera y Lepidóptera, son responsables de pérdidas que varían en países desarrollados (Wakil *et al.*, 2022).

Las plagas primarias son insectos capaces de atacar y dañar granos enteros y sanos (Guru *et al.*, 2022). Estos organismos poseen la habilidad mecánica de romper la cubierta dura de la semilla para alimentarse y depositar sus huevos; Muchas de estas especies realizan una "infestación oculta", donde las larvas se desarrollan íntegramente dentro del grano, consumiendo el endospermo y dejando la cáscara aparentemente intacta hasta que el adulto emerge (Banga *et al.*, 2020; Stejskal *et al.*, 2014).

Por esta razón, estas plagas primarias se consideran las más destructivas del almacenamiento, ya que generan más del 90 % de las pérdidas totales por insectos al iniciar la sucesión ecológica que facilita la colonización secundaria (Đukić *et al.*, 2018; Solà *et al.*, 2017). Por otra parte, se encuentran las plagas secundarias, las cuales solo pueden desarrollarse en granos que han sido previamente dañados, ya sea por plagas primarias, procesamiento mecánico o factores ambientales (Oliveira *et al.*, 2023).

A diferencia de las plagas primarias, los insectos secundarios no pueden penetrar la cubierta intacta de los granos sanos y dependen de daños preexistentes para su alimentación y ovoposición (Xu *et al.*, 2019). Esta sucesión ecológica entre plagas primarias y secundarias genera relaciones comensales, donde las primeras facilitan la colonización sin recibir beneficios aparentes de las segundas, lo que complica aún más el diseño de estrategias de manejo integrado al promover coexistencias espaciales y temporales en los ecosistemas de almacenamiento (Gerken y Morrison, 2023).

En este sentido, el gorgojo castaño de la harina *T. castaneum*, clasificado como plaga secundaria que se beneficia directamente de la acción de especies primarias como *Sitophilus* spp., ya que el daño inicial en los granos intactos y residuos generado incrementan su atractivo olfativo y favorecen el crecimiento poblacional al proporcionar sustratos accesibles como granos rotos, polvo y residuos (Rigopoulou *et al.*, 2023; Shah *et al.*, 2020; Winkle *et al.*, 2021).

### 3.6.1 Plagas secundarias

Las plagas secundarias de granos almacenados son organismos que, a diferencia de los colonizadores primarios, no poseen la capacidad biológica para perforar la capa externa de granos enteros y sanos; Se alimentan principalmente de granos partidos, polvillo, harinas, productos procesados (como pastas y galletas) o granos que han sido previamente dañados mecánicamente durante la cosecha o el transporte (Alkan *et al.*, 2023; Davyt *et al.*, 2019; Mokhtar *et al.*, 2021). La colonización de estas plagas se ve facilitada por la actividad previa de barrenadores primarios, los cuales perforan la envoltura del grano y dejan expuesto el endospermo (Trematerra *et al.*, 2000).

Las lesiones suelen comenzar como un raspado o rascado en la superficie del grano o semilla, que posteriormente evoluciona hacia la creación de galerías e incluso deformaciones completas de la estructura original del producto (Pires *et al.*, 2017).

Algunas plagas secundarias de gran relevancia son el escarabajo de sierra (*Oryzaephilus surinamensis*), frecuente en granos con alto contenido de

impurezas (Bandani, 2012; Ganesan *et al.*, 2021). Escarabajo de los granos (*Cryptolestes* spp.): Pequeños coleópteros que se alimentan de granos dañados o con moho (Ganesan *et al.*, 2021). *T. castaneum* una de las plagas más comunes en productos molidos a nivel mundial (Rigopoulou *et al.*, 2023; Wakil *et al.*, 2022).

### **3.7 Gorgojo Castaño de la harina *T. castaneum* Herberst**

Es un insecto perteneciente al orden Coleóptera y a la familia Tenebrionidae (Iyiola *et al.*, 2023, Shaharbano *et al.*, 2023). Se le conoce comúnmente como "escarabajo rojo de la harina" o "gorgojo castaño" debido a su coloración característica; Es clasificado como una plaga secundaria, lo que significa que generalmente no puede atacar granos enteros y sanos, sino que requiere que el grano esté previamente dañado por plagas primarias o que haya sido procesado como en el caso de la harina o el salvado (Alkan *et al.*, 2023; Vadivambal *et al.*, 2007).

Aunque su origen exacto se asocia históricamente con regiones tropicales, hoy en día tiene una distribución cosmopolita, encontrándose en casi cualquier lugar donde se almacenen alimentos (Iyiola *et al.*, 2023, Shaharbano *et al.*, 2023). Prospera especialmente en ambientes tropicales y subtropicales, aunque su capacidad de adaptación le permite sobrevivir en regiones áridas y semiáridas (Dal *et al.*, 2023; Shaharbano *et al.*, 2023).

#### **3.7.1 Clasificación taxonómica**

La clasificación taxonómica de *T. castaneum* (Herbst, 1797), conocido comúnmente como gorgojo rojo de la harina o escarabajo rojo de la harina, es la siguiente:

Reino: Animalia

Filo: Arthropoda

Clase: Insecta

Orden: Coleóptera

Familia: Tenebrionidae

Género: *Tribolium*

Especie: *Castaneum*

### 3.7.2 Morfología

La morfología de *T. castaneum* es fundamental para su identificación, siendo sus características morfológicas principales:

- 1.- Coloración: Los adultos presentan un color rojo-café brillante o castaño rojizo uniforme en todo su cuerpo (Dal *et al.*, 2023).
- 2.- Dimensiones: Es un insecto de tamaño pequeño, alcanzando una longitud de aproximadamente 3.5 mm en su etapa adulta (Klingler y Bucher., 2022).
- 3.- Cuerpo: Posee un cuerpo aplanado y alargado (oblongo) con los lados ligeramente curvos, lo que le facilita desplazarse entre los granos partidos y grietas estrechas (Dal *et al.*, 2023; Shaharbano *et al.*,2023).
- 4.- Tórax: El pronoto (la parte superior del tórax) está cubierto de pequeñas perforaciones o puntos densos, visibles bajo una lupa o microscopio (Dal *et al.*,2023)
- 5.- Élitros Estriados: Sus alas endurecidas, conocidas como élitros, presentan crestas o líneas longitudinales bien definidas que recorren toda su extensión (Dal *et al.*, 2023).
- 6.- Antenas: Una característica distintiva de esta especie es que sus antenas terminan en una maza compuesta por tres segmentos finales que son notablemente más grandes y anchos que el resto de los segmentos antenales (Klingler y Bucher, 2022; Shaharbano *et al.*,2023)

Estas características permiten que el insecto no solo sea resistente a condiciones ambientales adversas, sino que también pueda esconderse

eficazmente en los sitios de almacenamiento para evadir los controles físicos (Shaharbano *et al.*,2023).

### 3.7.3 Biología y ciclo de vida

El ciclo biológico del gorgojo castaño de la harina es un proceso de metamorfosis completa (holometábola) que consta de cuatro etapas principales (Devi, 2015).

Huevo: Los huevos son minúsculos, con un tamaño aproximado de 2.9 mm de longitud y 0.7 mm de ancho, de forma cilíndrica y color blanco amarillento o grisáceo. En el periodo de incubación dura generalmente entre 3 y 7 días bajo condiciones óptimas (como 32°C) (Klingler y Bucher,2022).

Larva: En esta etapa, el insecto se presenta como una oruga cilíndrica de color blanquecino a amarillo pálido, con un cuerpo segmentado y cubierto de finas sedas (Giunti *et al.*, 2018). Pasan por un número variable de instares, generalmente de 5 a 12, antes de pupar (Vadivambal *et al.*, 2007).

Pupa: Durante la fase de pupa, que dura aproximadamente de 6 a 8 días, el insecto experimenta una transformación morfológica significativa (Vommaro *et al.*, 2024). Esta fase es crucial para el desarrollo, ya que internamente los tejidos larvales se reorganizan para dar origen a las estructuras del adulto (Castro *et al.*, 2023).

Adulto: Los adultos presentan un cuerpo ovalado aplanado de color rojo-marrón, con longitud de 4-5 mm, élitros curvados lateralmente, cabeza prognata visible desde dorsal sin rostro picudo, antenas capitadas y piezas bucales masticadoras (Matsumura y Miyatake, 2015).

La duración total del ciclo depende estrechamente de factores ambientales como la temperatura, la humedad y el tipo de alimento disponible (Deb y kumar 2021; Manideep *et al.*, 2024).

### 3.7.4 Tipos de daños de *T. castaneum*

El daño ocasionado puede clasificarse como:

Daño directo:

- Consumo de harinas y granos quebrados.
- Reducción del contenido nutricional.
- Disminución del peso del lote almacenado.

Daño indirecto:

- Contaminación del producto con residuos metabólicos.
- Producción de compuestos quinónicos que generan olor desagradable y alteran el sabor.
- Incremento de temperatura dentro del granel por actividad metabólica.
- Favorecimiento del crecimiento fúngico.

La producción de benzoquinonas por los adultos es particularmente relevante, ya que deteriora la calidad organoléptica del producto almacenado (Hagstrum *et al.*, 2013).

## 3.8 Métodos de control

Diversas estrategias para el control de plagas de granos almacenados se clasifican en físicas, químicas, biológicas e integradas de manejo de plagas, destacando las primeras por su bajo impacto ambiental mediante el uso de polvos inertes, las químicas por su alta eficacia inmediata, aunque limitadas por la resistencia creciente, y las biológicas por agentes que ofrecen control sostenido sin residuos (Adarkwah *et al.*, 2017; Mishra *et al.*, 2024; Wakil *et al.*, 2023).

De esta manera, la optimización de los programas de manejo integrado de plagas, que incorporan una combinación de estos métodos, resulta fundamental para asegurar la calidad y seguridad de los granos almacenados (Negi *et al.*, 2021).

En el control físico estos métodos actúan mecánicamente sobre el insecto, evitando el desarrollo de resistencia química como la aplicación de polvos inertes como la tierra de diatomeas ha mostrado ser una medida efectiva para el control de insectos de granos almacenados, ya que su acción abrasiva y absorbente sobre la cutícula de los insectos provoca su deshidratación y muerte (Wakil *et al.*, 2023).

El control biológico se enfoca en el uso de organismos vivos o sus productos para suprimir las poblaciones de plagas (Miranda y Grillo, 2021). En este contexto, hongos entomopatógenos como *Beauveria bassiana* y *Metarhizium anisopliae*, junto con parasitoides como *Anisopteromalus calandrae*, representan opciones viables para la supresión específica de poblaciones de plagas (Tamilarasan *et al.*, 2025).

La estrategia más recomendada es el Manejo Integrado de Plagas, que combina varios métodos de control para minimizar la dependencia de los insecticidas sintéticos y lograr una gestión de plagas sostenible y eficaz, abordando la resistencia y la seguridad alimentaria (Baghazaoui *et al.*, 2024).

El control químico como fosfuro o bromuro de metilo ha sido tradicionalmente la estrategia predominante debido a su eficacia inmediata contra infestaciones masivas en granos almacenados (Musso *et al.*, 2017). Sin embargo, la implementación de estos fumigantes ha generado problemas significativos como la eco toxicidad y el desarrollo de resistencia en poblaciones de insectos, lo que subraya la necesidad de alternativas más sostenibles (Bello *et al.*, 2017).

### **3.9 Bifentrina**

La bifentrina es un insecticida y acaricida perteneciente a la familia de los piretroides sintéticos (Grupo 3A del IRAC), ampliamente utilizado en la protección de granos almacenados y otros cultivos debido a su alta eficacia y persistencia (Beer *et al.*, 2022; Magano *et al.*, 2021).

Algunos estudios de neurotoxicidad sugieren que la bifentrina actúa como un piretroide de tipo mixto, induciendo síntomas tanto de hiperexcitabilidad como de parálisis progresiva (Gammon *et al.*, 2018).

La bifentrina actúa principalmente por contacto e ingestión, afectando el sistema nervioso de los insectos al interferir con la función de los canales de sodio en las membranas neuronales, lo que conduce a una hiperexcitación y parálisis (Ibelli, 2007). La molécula se une a los sitios receptores en el canal de sodio y estabiliza su estado abierto, impidiendo que el canal se cierre después de la transmisión de un impulso (Silver *et al.*, 2014; Magano *et al.*, 2021).

Este ingrediente activo destaca por su capacidad para controlar especies resistentes a otros químicos como la fosfina (Magano *et al.*, 2021). Su acción insecticida se extiende a través de una amplia gama de plagas de almacén, incluyendo coleópteros y lepidópteros, proporcionando una protección residual prolongada; Sin embargo, su uso continuado ha suscitado preocupaciones sobre la evolución de la resistencia en diversas poblaciones de insectos, así como sobre su impacto eco toxicológico y en la salud humana (Cao *et al.*, 2014; Gargouri *et al.*, 2018).

La resistencia se ha notado en secuestro de las enzimas esterases específicamente E2 y E3 que actúan "atrapando" las moléculas de bifentrina, impidiendo que lleguen a su sitio de acción en el sistema nervioso, la afinidad de estas esterases es notablemente mayor por la bifentrina que por otros insecticidas; además de las esterases, se ha observado una actividad elevada de lipasas y la enzima laccase2 en cepas resistentes, lo que sugiere un sistema de defensa metabólico coordinado; además el ingrediente activo puede modificar los tiempos y patrones de desarrollo en plagas de granos almacenados (Julio *et al.*, 2017; Shamjana y Grace, 2021).

#### **4 Lambda cyalotrina**

La lambda cyalotrina es un potente insecticida y acaricida de la familia de los piretroides sintéticos (Grupo 3A del IRAC), ampliamente reconocido por su alta toxicidad hacia una vasta gama de insectos, es un piretroide de Tipo II (contiene

un grupo alfa-ciano en su estructura), lo que le otorga propiedades neurotóxicas más acentuadas (Wakil *et al.*, 2024, 2025).

Su mecanismo de acción primario implica la interacción con los canales de sodio dependientes de voltaje en las membranas neuronales, lo que resulta en una prolongada despolarización y el bloqueo de la repolarización (Haddi *et al.*, 2018). Esta acción se debe a la capacidad de las moléculas para unirse a los canales iónicos y prolongar su apertura, causando una afluencia continua de iones de sodio al interior de la célula nerviosa, lo que se traduce en hiperexcitación neuronal sostenida (Pimentel *et al.*, 2005).

Este insecticida se considera uno de los componentes más tóxicos y efectivos para proteger productos postcosecha, en superficies como el concreto de silos y almacenes, ha demostrado una persistencia residual de hasta 180 días, superando a otros insecticidas como el malatión (Wakil *et al.*, 2024).

Hay dos vías principales por las cuales los insectos desarrollan resistencia a este insecticida una es en el sitio de acción *knockdown resistance (kdr)*, en las diversas especies de artrópodos presentan mutaciones genéticas en los canales de sodio; Estas mutaciones, denominadas *kdr*, alteran la estructura del canal y reducen significativamente la capacidad de unión de la lambda cialotrina, permitiendo que el insecto sobreviva a dosis letales (Silver *et al.*, 2014, Siegwart *et al.*, 2016). Otra vía es la desintoxicación metabólica que se ha documentado que las poblaciones resistentes presentan una mayor capacidad para degradar el insecticida mediante un incremento en la desintoxicación enzimática este mecanismo metabólico neutraliza la molécula de la lambda cialotrina antes de que pueda alcanzar el sistema nervioso central del insecto (Beer *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2024).

#### 4.1 Dimetoato

El dimetoato es un insecticida y acaricida de amplio espectro que pertenece a la familia de los organofosforados (Grupo 1B del IRAC), es ampliamente utilizado en la agricultura para el control de una gran variedad de insectos succionadores y masticadores, tanto por contacto, ingestión, y destaca por sus propiedades sistémicas (Mavrogenis *et al.*, 2023).

Este ingrediente activo actúa como un inhibidor de la enzima acetilcolinesterasa, la cual es fundamental para el funcionamiento del sistema nervioso tanto en insectos como en vertebrados; La Acumulación de Acetilcolina: Al bloquear la AChE, la enzima ya no puede hidrolizar la neurotransmisora acetilcolina. Esto provoca una acumulación excesiva de acetilcolina en las sinapsis nerviosas, lo que lleva a una hiper-estimulación ininterrumpida de los receptores nicotínicos y muscarínicos (Fukuto,1990; Samith *et al.*, 2017).

La resistencia en insectos de granos almacenados es un desafío técnico derivado del uso prolongado de insecticidas organofosforados; Es un potente inhibidor de la enzima acetilcolinesterasa, las poblaciones de plagas han desarrollado defensas bioquímicas que neutralizan su efecto (Wang *et al.*, 2004; Lokeshwari *et al.*, 2016).

Las poblaciones resistentes pueden presentar mutaciones genéticas que alteran la estructura de esta enzima, reduciendo su afinidad por el insecticida y permitiendo que el insecto sobreviva a dosis que normalmente serían letales (Guedes *et al.*, 1997; Lokeshwari *et al.*, 2016).

La nanotecnología surge como una alternativa prometedora para el control de plagas en granos almacenados, ofreciendo soluciones más eficientes mediante el empleo de materiales nano escalados que pueden superar los problemas de resistencia y toxicidad asociados a los insecticidas convencionales (Rivera *et al.*, 2026).

## 4.2 Nanotecnología

La nanotecnología es una disciplina emergente que emplea materiales y dispositivos a escala nanométrica para potenciar la eficacia de los agroquímicos, reducir la cantidad necesaria de plaguicidas, y prolongar su efecto (Anjaria y Vaghela, 2024).

Esta aproximación se centra en particular en nanoformulaciones de ingredientes activos dentro de matrices poliméricas o lipídicas, que facilita una liberación sostenida y dirigida, optimizando así la penetración a través de la cutícula de los insectos y su estabilidad frente a la degradación ambiental (Khandehroo *et al.*, 2022; Yousef *et al.*, 2023).

De esta manera, se logra una mayor eficacia tóxica con dosis reducidas, minimizando impactos no deseados en el ecosistema y superando limitaciones de los plaguicidas convencionales (Guru *et al.*, 2022). Por ejemplo, se ha observado que nanopartículas de silicio, cobre, zinc y grafito pueden potenciar el efecto insecticida de extractos comerciales contra plagas como *Sitophilus zeamais* (Uribe-Rivera *et al.*, 2025). Esto sugiere que la nanotecnología ofrece las herramientas necesarias para transitar hacia una agricultura de precisión, donde el uso de recursos se minimiza y la protección de los cultivos se maximiza mediante la manipulación de la materia a escala atómica (Aflatouni, 2025; Alvarado *et al.*, 2019).

### 4.2.1 Nanoformulaciones.

Las nanoformulaciones son sistemas complejos compuestos por nanos portadores y un ingrediente activo, se definen técnicamente como productos que contienen nanopartículas con al menos una dimensión en el rango de 1 a 100 nm, aunque este límite puede extenderse hasta los 1,000 nm si el material ha sido diseñado para exhibir propiedades específicas dependientes del tamaño (Dechbumroong *et al.*, 2024; Grebler *et al.*, 2025; Jaybhaye, 2025).

## 4.3 Clasificación de nanoformulaciones

### 4.3.1 Nanoportadores Orgánicos

Se caracterizan por su alta biocompatibilidad y biodegradabilidad, lo que los hace ideales para reducir los residuos químicos en productos alimenticios (Yousef *et al.*, 2023).

Se dividen en dos subcategorías:

- **Basados en Lípidos:** Incluyen liposomas (vesículas de fosfolípidos), nanoemulsiones (gotas de aceite en agua < 200 nm) y nanopartículas lipídicas sólidas; Son altamente biocompatibles y excelentes para transportar aceites esenciales o fármacos lipofílicos (Huang *et al.*, 2024; Jaybhaye, 2025; Khandehroo *et al.*, 2022).
- **Poliméricos:** Estructuras fabricadas con polímeros naturales (como el quitosano) o sintéticos. Se dividen en nanocápsulas (el activo está en un núcleo central rodeado por una membrana) y nanoesferas (el activo está disperso uniformemente en una matriz polimérica) (Grebler *et al.*, 2025., Yousef *et al.*, 2023).

### 4.3.2 Nanoportadores Inorgánicos

Utilizan materiales no orgánicos que ofrecen una estabilidad mecánica y térmica excepcional, protegiendo al insecticida de la degradación por luz UV o calor extremo (Dechbumroong *et al.*, 2024; Khalid-Salako *et al.*, 2025).

- **Metálicos y Óxidos Metálicos:** Nanopartículas de plata, cobre, zinc u oro (Khalid-Salako *et al.*, 2025). Estos materiales no solo transportan el activo, sino que a menudo poseen propiedades insecticidas y antimicrobianas propias que actúan en sinergia con el químico (S y Thangapandiyan, 2019; Zavala-Zapata *et al.*, 2024).
- **Basados en Sílice:** Especialmente la sílice meso porosa, que cuenta con una estructura de poros internos donde se cargan grandes cantidades de insecticida, permitiendo una liberación programada muy precisa (Khalil, 2019; Jaybhaye, 2025).

### 4.3.3 Nanoportadores Basados en Carbono

Es el grupo central de su estudio debido a su capacidad para actuar como agentes físicos y químicos simultáneamente (Bhattacharya *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2022).

- **Grafeno y Óxido de Grafeno:** Materiales bidimensionales con bordes afilados que destruyen físicamente la cutícula del insecto (abrasión), facilitando la entrada del insecticida (Chen *et al.*, 2022 Lampiri *et al.*, 2025).
- **NPsGr:** Actúan como potenciadores que pueden elevar la eficacia de los ingredientes activos químicos (Roque-Enriquez *et al.*, 2025).
- **Nanotubos de Carbono y Fullerenos:** Poseen una gran área superficial que permite "anclar" múltiples moléculas de insecticida para una entrega de alta densidad en el objetivo (Huang *et al.*, 2024; Ammer *et al.*, 2025).

## 4.4 NPsGr

Son materiales basados en carbono que han cobrado gran relevancia en la agricultura moderna debido a su capacidad para actuar como agentes insecticidas físicos y, sobre todo, como potenciadores de compuestos químicos tradicionales (Bhattacharya *et al.*, 2022; Roque-Enriquez *et al.*, 2025).

### 4.4.1 Modos de acción de NPsGr

Las NPsGr actúan principalmente a través de medios físicos, estas partículas se adhieren al cuerpo del insecto y causan micro-heridas en la cutícula protectora (Lampiri *et al.*, 2024,2025). Esto rompe la capa de cera que evita la pérdida de agua, derivando en la muerte por deshidratación del organismo (Zavala-Zapata *et al.*, 2024).

Una de las aplicaciones más prometedoras es la mezcla de NPsGr con ingredientes activos que aumentan la penetración del daño físico que causan en

la cutícula crea "canales" o vías de entrada que permiten que los insecticidas químicos penetren más rápido y en mayor cantidad al interior del insecto (Wang *et al.*, 2018).

Esta facilitación de la penetración se traduce en un incremento significativo de la toxicidad de los insecticidas convencionales, lo que puede elevar su efectividad hasta diez veces (Manna *et al.*, 2023).

Comparado con los fumigantes químicos puros, el grafito es químicamente estable y presenta una toxicidad baja para los mamíferos cuando se maneja adecuadamente (Bhattacharya *et al.*, 2022).

## **5 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **5.1 Ubicación del experimento**

La presente investigación se realizó en el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología Agrícola, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), con sede en Saltillo, Coahuila.

### **5.2 Obtención y mantenimiento de colonias**

El pie de cría de *T. castaneum* fue proporcionado por el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología de la UAAAN, estos estaban libres de aplicación de insecticidas, los insectos se establecieron en harina de trigo en contenedores de plástico, estos se colocaron en cámaras bioclimáticas para su desarrollo.

### **5.3 Establecimiento de bioensayo**

En la evaluación se empleó la prueba de susceptibilidad IRAC 025, con ligeras modificaciones, para el efecto insecticida se empleó la técnica película residual en cajas Petri; para ello se colocó 1 ml del producto sobre la caja y con un movimiento homogéneo se esparció uniformemente sobre la superficie de la caja, una vez realizado estos movimientos se esperó a que se secase el líquido completamente para posteriormente colocar los insectos adultos en las cajas. Se evaluaron 3 insecticidas comerciales, dos productos piretroides y un organofosforado las concentraciones evaluadas fueron 100, 1000, 2000, 3000, 4000 ppm solos y potenciados con NPsGr.

### **5.4 Criterio de mortalidad o evaluación**

El criterio utilizado para considerar a un individuo muerto fue aquellos que no respondieron a un estímulo de calor, en la cual se buscaba alguna respuesta del insecto en una plancha de calor con un rango de entre 30C° y 35C°.

## **5.5 Análisis estadístico**

Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de mortalidad y se sometieron a un análisis de varianza de comparación de medias (Tukey  $p > 0.05$ ), las medias obtenidas fueron sometidas a un análisis dosis-respuesta para calcular la  $CL_{50}$  en el programa estadístico Statistical Analysis System (SAS) versión 9.0.

## 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tras la obtención de los datos experimentales de los bioensayos, se procedió al cálculo del porcentaje de mortalidad correspondiente a cada tratamiento. Los resultados presentados en el Cuadro 1 demuestran que la mortalidad de *T. castaneum* en el tratamiento de 4000 ppm en combinación con nanopartículas al 10 %, logró una mortalidad del 84.44 %, superando notablemente los resultados obtenidos con el producto solo el cual en la dosis más alta se reporta una mortalidad del 50 %. De acuerdo con Lampiri *et al.* (2025), subrayaron el potencial de las nanotecnologías para potenciar insecticidas convencionales, lo cual resulta clave para combatir la resistencia observada en poblaciones de esta plaga, en tratamientos de superficie, el grafeno puede alcanzar el 100 % de mortalidad en *T. castaneum* tras 14 días de exposición, aunque los efectos iniciales se observan desde los primeros días. Gao *et al.* (2021), evaluaron el control de ácaros con piretroides alcanzando una mortalidad de 83.65 % combinado con óxido de grafeno.

**Cuadro 1.** Mortalidad evaluada a las 72 h de *T. castaneum* expuesto a bifentrina en combinación con NPsGr.

ppm	NPsGr (%) Bifentrina		
	P. S.	3%	10%
100	27.77 d	24.44 d	25.55 e
1000	43.33 c	37.77 c	41.11 d
2000	37.77 b	60.00 b	63.33 c
3000	37.77 b	60.00 b	71.11 b
4000	50.00 a	67.77 a	84.44 a

P. S= Producto solo (columna).

Las letras a, b, c, d indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en concentraciones del insecticida (columna) para un mismo nivel de NPsGr.

Los resultados del Cuadro 2 demuestran un incremento progresivo en la mortalidad de *T. castaneum* al aumentar la concentración de NPsGr y lambda cialotrina, alcanzando su punto máximo de mortalidad con el 63.33 % a 4000 ppm adicionado con 10 % de NPsGr, comparando con el producto solo que obtuvo un 30 % de mortalidad a 4000 ppm. Estos resultado concuerda con Chen *et al*, (2022), quienes demostraron que el grafeno incrementa la actividad insecticida de lambda cialotrina frente a la oruga del algodón, las formulaciones optimizadas 3/1 de cialotrina/grafeno presentaron la mayor capacidad inhibitoria y tasas de mortalidad, con valores de 62.91 %, específicamente, la aplicación de 100 µg/mL de cialotrina/grafeno mostró un efecto superior, reduciendo la longitud corporal en 1.40 mm y el peso en 1.88 mg, con una mortalidad del 61.85 %. Este mecanismo se debe a que el transporte mediante grafeno facilita la alteración de las células espinosas de la epicutícula del insecto, elevando la permeabilidad y, por ende, la toxicidad del insecticida. Ammer *et al.* (2025), reportaron que al usar un nanocida a base de carbono obtuvo una mortalidad larvaria de 33.3 % a una concentración de 0.1 mg/ml, la puntuación media de mortalidad adulta para la concentración de 0,1 mg/mL fue de 36.7 %.

**Cuadro 2.** Mortalidad evaluada a las 72 h de *T. castaneum* expuesto a lambda cialotrina en combinación con NPsGr.

Ppm	NPsGr (%) Lambda cialotrina		
	P. S.	3%	10%
100	10.00 e	15.55 e	16.66 e
1000	14.44 d	20.00 d	28.88 d
2000	16.66 c	25.55 c	32.22 c
3000	27.77 b	28.88 b	48.88 b
4000	30.00 a	37.77 a	63.33 a

P. S= Producto solo (columna).

Las letras a, b, c, d indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en concentraciones del insecticida (columna) para un mismo nivel de NPsGr

Los resultados presentados en el Cuadro 3 evidencian una mortalidad eficaz de *T. castaneum* al combinar NPsGr con dimetoato, alcanzando una eficacia máxima del 95.55 % a 4000 ppm al 10 % de NPsGr y un 85.55 % a 3000 ppm al 10 % de NPsGr en comparación con el producto solo donde se reporta una mortalidad del 75.55 % siendo más baja que las combinaciones. Resultados similares a Kadir *et al.*, (2025), reportaron que las nanopartículas de nanotubos de carbono obtuvieron una mortalidad del 70 al 100 % en adultos de *Sitophilus granarius* después de 8 días a 100 ppm. Li *et al.* (2022), mostraron que el óxido de grafeno combinado con pesticidas muestra una excelente capacidad de absorción y buen desplazamiento como portador de pesticidas en la oruga cogollera del maíz, (*Spodoptera frugiperda*), ya que los valores de mortalidad variaron del 12.50 % al 72.39 % bajo el tratamiento metoxihidrazida como producto solo, combinado con óxido de grafeno varió del 30.56 % al 96.06 % después del tratamiento, es decir, un 18,06 % más alto que el de metoxihidrazida solo.

**Cuadro 3.** Mortalidad evaluada a las 72 h de *T. castaneum* expuesto a dimetoato cialotrina en combinación con NPsGr.

ppm	NPsGr (%) Dimetoato		
	P.S.	3%	10%
100	51.11 d	54.44 e	61.11 a
1000	57.77 c	63.33 d	66.66 d
2000	61.11 b	72.22 c	76.66 c
3000	61.11 b	84.44 b	85.55 b
4000	75.55 a	87.77 a	95.55 a

P. S= Producto solo (columna).

Las letras a, b, c, d indican diferencia significativa ( $p < 0.05$ ) en concentraciones del insecticida (columna) para un mismo nivel de NPsGr

Al analizar los datos del Cuadro 4, el tratamiento P.S. presenta una CL<sub>50</sub> elevada de 12035 ppm, sin embargo, en los tratamientos de nanopartículas al 3 % y 10 % mostraron una CL<sub>50</sub> de 1055 y 757.59 ppm respectivamente, evidenciando una mayor potencia letal, con una RS de 11.40x a 15.88x veces más respectivamente en comparación con el producto solo, lo que confirma que la combinación de bifentrina con nanopartículas mejora significativamente la eficacia y el control contra las poblaciones de *T. castaneum*. Batool *et al.* (2020), utilizaron una proteasa de cisteína de 25 kDa extraída de semillas de *Albizia procera* contra *T. castaneum* se ha observado que la CL<sub>50</sub> a las 72 horas puede situarse alrededor de 0.577 mg/L.

**Cuadro 4.** Dosis letal en *T. castaneum* en diferentes concentraciones de NPsGr y bifentrina a las 72 h.

Tratamientos	CL <sub>50</sub> (ppm)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P- valor	RS
P.S.	12035	3580	7044	Y=-1.116+0.273	<0.0073	
3	1055	260.83	3019	Y=-2.366+0.782	<0.0001	11.40x
10	757.59	54.73	2300	Y=-2.687+0.933	<0.0001	15.88x

CL<sub>50</sub>: Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL<sub>50</sub>.

Al analizar los datos del Cuadro 5, se observa una CL<sub>50</sub> de 3504 ppm en el tratamiento al 10 % mostrando una RS de 24.57x veces más, en comparación con el producto solo el cual registro un CL<sub>50</sub> de 86097 ppm siendo la más alta. El tratamiento al 3 % mostró una reducción de CL<sub>50</sub> de 63063 ppm, con la RS de 1.36x veces más. Gupta *et al.* (2021), reportaron los índices de RS con malatión combinado con óxido de grafeno en *Aedes aegypti* obteniendo un hallazgo de 5.11x más veces. Lampiri *et al.* (2024), evaluaron polvos de grafeno como nuevos pesticidas como su actividad insecticida en plagas como *Sitophilus oryzae*, *Rhyzopertha dominica* y *Prostephanus truncatus*, utilizando diferentes concentraciones, es decir, 100, 500 y 1000 ppm sobre la mortalidad de insectos

adultos después de 3, 7, 14 y 21 días, resaltando que las tasas de mortalidad de adultos no superaron el 20 y 14 % incluso en el día 21 de exposición para todas las concentraciones.

**Cuadro 5.** Dosis letal en *T. castaneum* en diferentes concentraciones de NPsGr y lambda cyalotrina a las 72 h.

Tratamientos	CL <sub>50</sub> (ppm)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P- valor	RS
PS	86097	19471	8902930	Y=-1.116+0.273	<0.0002	
3	63063	14020	12362117	Y=-2.366+0.782	<0.0007	1.36x
10	3504	---	----	Y=-2.687+0.933	0.0020	24.57x

CL<sub>50</sub>: Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL<sub>50</sub>

Al analizar los datos del Cuadro 6, en el P.S. se observa el valor de la CL<sub>50</sub> de 119.17 ppm, en comparación con los tratamientos al 3 y 10 % los cuales presentaron una CL<sub>50</sub> de 96.70 y 55.87 ppm respectivamente, logrando una mayor eficiencia letal, con una RS de 1.23X y 2.13x veces más respectivamente, confirmando que la combinación de dimetoato con NPsGr potencia significativamente la eficacia del insecticida, consolidándose como una estrategia viable para mitigar la resistencia creciente en poblaciones de *T. castaneum*. Roque-Enriquez *et al.* (2025), registraron la mortalidad de ninfas de *Bacteria cockerelli*, utilizando dimetoato solo presentaron una CL<sub>50</sub> de 492.35 mg/L mientras que al combinarlo con NPsGr al 10 % presento una CL<sub>50</sub> de 57.31 mg/L, presentando una RS de 8.59x más veces.

**Cuadro 6.** Dosis letal en *T. castaneum* en diferentes concentraciones de NPsGr y dimetoato a las 72 h.

Tratamientos	CL <sub>50</sub> (ppm)	LFI	LFS	Ec. Predicción	P- valor	RS
PS	119.17	1.07	377.48	Y=-0.605+0.291	<0.0031	
3	96.70	4.07	462.19	Y=-1.138+0.573	<0.0013	1.23x
10	55.87	---	---	Y=-1.029+0.589	0.0167	2.13x

CL<sub>50</sub>: Concentración letal media. LFI: Límite fiducial inferior. LFS: Límite fiducial superior. RS: Relación de sinergia en valores de CL<sub>50</sub>

## 7 CONCLUSIÓN

Los insecticidas incrementaron la mortalidad de *T. castaneum* al ser combinados con las nanopartículas de grafito, además incrementaron la relación de sinergia permitiendo reducir la dosis hasta 24 veces su valor, obteniendo con ello una disminución del uso de ingredientes activos químicos, por lo que se sugiere continuar con dicha investigación tanto a nivel laboratorio y campo.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

- Abdelsamea, M. M. (2023). A logarithmically amortising temperature effect for supervised learning of wheat solar disinfestation of rice weevil *Sitophilus oryzae* (Coleóptera: Curculionidae) using plastic bags. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29594-w>
- Adarkwah, C., Obeng-Ofori, D., Hörmann, V., Ulrichs, C., & Schöller, M. (2017). Bioefficacy of enhanced diatomaceous earth and botanical powders on the mortality and progeny production of *Acanthoscelides obtectus* (Coleóptera: Chrysomelidae), *Sitophilus granarius* (Coleóptera: Dryophthoridae) and *Tribolium castaneum* (Coleóptera: Tenebr. *International Journal of Tropical Insect Science*, 37(4), 258. <https://doi.org/10.1017/s1742758417000170>
- Aflatouni, F. (2025). Advancements in Nanotechnology: Revolutionizing Medicine and Electronics. *International Journal of Innovative Computer Science and IT Research*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.63665/ijicsitr.v1i01.03>
- Alkan, M. A. (2023). Efficacy of Surface Applications of Diaterra® against *Sitophilus granarius* L. (Coleóptera: Curculionidae) and *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleóptera: Tenebrionidae). *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3184996/v1>
- Alvarado, K., Bolaños, M., Camacho, C., Quesada, E. M., & Vega-Baudrit, J. R. (2019). Nanobiotechnology in Agricultural Sector: Overview and Novel Applications. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 10(2), 120–141. <https://doi.org/10.4236/jbnb.2019.102007>
- Ammer, A. A. (2025). Carbon-based nanocide against the red flour beetle *tribolium castaneum*. *Journal of Biopesticides*, 18(1), 63–68. <https://doi.org/10.57182/jbiopestic.18.1.63-68>
- Anjaria, P. &. (2024). Toxicity of agrochemicals: Impact on environment and human health. *Deleted Journal*, 2(1). <https://doi.org/10.59400/jts.v2i1.250>
- Aroca, I. A.-R.-A. (2023). Convolutional neural networks ResNet-50 for weevil detection in corn kernels. *Scientia Agropecuaria*, 13(3), 385–394. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2023.034>

- Arredondo, J. V. (2016). Analysis and evaluation of economic policy instruments for environmental control in Mexico. *HAL (Le Centre Pour La Communication Scientifique Directe)*. <https://theses.hal.science/tel-01800103>
- Ávila, D. L. (2016). Insectos plaga de granos almacenados. Impacto en la seguridad alimentaria del municipio Las Tunas, Cuba. *La Técnica Revista de Las Agrociencias ISSN, 2477-8982, 23–23*. [https://doi.org/10.33936/la\\_tecnica.v0i0.1023](https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i0.1023)
- Badran, E., Abdelmaksoud, T. G., El-Shazly, E. A. A., & Ahmed, S. S. (2025). Impact of red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleóptera: Tenebrionidae) infestation on some quality characteristics of stored wheat flour. *Food Systems, 8(2)*, 173–179. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-2-173-179>
- Baghazaoui, R. E. (2024). Ecological Management of Stored Grain Pests: Global Insights and Future Directions. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 1398(1)*, 12026-12026. <https://doi.org/10.1088/17551315/1398/1/012026>
- Bandani, A. R. (2012). New Perspectives in Plant Protection. *In InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/2299>
- Banga, K. S. (2020). Major insects of stored food grains. *International Journal of Chemical Studies, 8(1)*. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i1aj.8624>
- Barahona, J. K. (2017). Producción y almacenamiento público de arroz y maíz en Ecuador entre los años 2012 y 2014: beneficios y retos. *RePEc: Research Papers in Economics, 8(25)*, 176–182. <http://www.eumed.net/rev/tlatemoani/25/arroz-ecuador.html>
- Batool, M. H.-u.-H. (2020). Graphene quantum dots as cysteine protease nanocarriers against stored grain insect pests. *Scientific Reports, 10(1)*. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60432-5>
- Beer, B. D. (2022). High-Resolution Genetic Mapping Combined with Transcriptome Profiling Reveals That Both Target-Site Resistance and Increased Detoxification Confer Resistance to the Pyrethroid Bifenthrin in

- the Spider Mite *Tetranychus urticae*. *Biology*, 11(11), 1630–1630. <https://doi.org/10.3390/biology11111630>
- Bello, G. M. (2017). Insecticidal efficacy of beauveria bassiana, diatomaceous earth and fenitrothion against rhizopertha dominica and tribolium castaneum stored wheat. *International Journal of Pest Management*, 64(3), 279–286. <https://doi.org/10.1080/09670874.2017.1397300>
- Bhattacharya, N. C. (2022). Graphene as a nano-delivery vehicle in agriculture – current knowledge and future prospects. *Critical Reviews in Biotechnology*, 43(6), 851–869. <https://doi.org/10.1080/07388551.2022.2090315>
- Bokusheva, R. F. (2012). Factors determining the adoption and impact of a postharvest storage technology. *Food Security*, 4(2), 279–293. <https://doi.org/10.1007/s12571-012-0184-1>
- Cao, Z. C. (2014). Nanomolar Bifenthrin Alters Synchronous Ca<sup>2+</sup> Oscillations and Cortical Neuron Development Independent of Sodium Channel Activity. *Molecular Pharmacology*, 85(4), 630–639. <https://doi.org/10.1124/mol.113.090076>
- Cartaxo, P. H. (2020). Bactrocera carambolae Drew & Hancock (Diptera: Tephritidae): Riscos para a Fruticultura Brasileira. *Research Society and Development*, 9(8). <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i8.6608>
- Castañeda, J. F. (2022). Contributing to food security from local knowledge. The production of native corn by the Poblano Council for Conservation Agriculture. *Argumentos Estudios Críticos de La Sociedad*, 100, 305–325. <https://doi.org/10.24275/uamxoc-dcsh/argumentos/2022100-14>
- Castro, N. P. (2023). Condiciones de desarrollo del organismo modelo, *Tribolium Castaneum* Herbst (Coleóptera: Tenebrionidae). *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 18(1), 97–105. <https://doi.org/10.18359/rfcb.6694>
- Chen, X. S. (2022). Global food stability and its socio-economic determinants towards sustainable development goal 2 (Zero Hunger). *Sustainable Development*, 31(3), 1768–1780. <https://doi.org/10.1002/sd.2482>

- Chen, Z. Z. (2022). Graphene-Delivered Insecticides against Cotton Bollworm. *Nanomaterials*, 12(16), 2731–2731. <https://doi.org/10.3390/nano12162731>
- Cuero, J. M. (2025). Desarrollo rural y política pública análisis crítico al programa Precios de Garantía. *Estudios Sociales Revista de Alimentación Contemporánea y Desarrollo Regional*. <https://doi.org/10.24836/es.v35i66.1605>
- Dal, A. E. (2023). Phytochemical analysis and insecticidal activities of seed extracts from *Oenanthe pimpinelloides* L. treated paper samples vs. *Tribolium castaneum*. *BioResources*, 18(2), 3509–3521. <https://doi.org/10.15376/biores.18.2.3509-3521>
- Davyt, B. P. (2019). Rol de las secreciones volátiles de *Tribolium castaneum* en la interacción con el hongo entomopatógeno *Beauveria bassiana*. *Encuentro de Becarios de La UNLP (EBEC) (La Plata, 2018)*, 6, 117–117. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/95005>
- Deb, M. &. (2021). Studies on the biology of *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) (Coleóptera: Tenebrionidae) with stereomicroscopic images of its life stages. *ENTOMON*, 46(1), 81–86. <https://doi.org/10.33307/entomon.v46i1.590>
- Dechbumroong, P. H. (2024). Recent advanced lipid-based nanomedicines for overcoming cancer resistance [Review of Recent advanced lipid-based nanomedicines for overcoming cancer resistance]. *Cancer Drug Resistance*. <https://doi.org/10.20517/cdr.2024.19>
- Devi, M. B. (2015). Biology of Rust-Red Flour Beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleóptera: Tenebrionidae). *Biological Forum*, 7(1), 12–15. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20153254870>
- Đukić, N. R. (2018). Attractiveness of infested and uninfested whole wheat grain and coarse wheat meal odors to coleopteran storage insect pests. *Food and Feed Research*, 45(7). <https://doi.org/10.5937/ffr1802113d>

- Erenstein, O. J. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 14(5), 1295–1319. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- Ferraris, M. N. (2021). Plagas en granos almacenados. *LA Referencia (Red Federada de Repositorios Institucionales de Publicaciones Científicas)*. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/9269>
- Fukuto, T. R. (1990). Mechanism of action of organophosphorus and carbamate insecticides. [Review of Mechanism of action of organophosphorus and carbamate insecticides.]. *Environmental Health Perspectives . National Institute of Environmental Health Sciences.*, 87, 245–254. <https://doi.org/10.1289/ehp.9087245>
- Gammon, D. W.-N. (2018). Pyrethroid neurotoxicity studies with bifenthrin indicate a mixed Type I/II mode of action. *Pest Management Science*, 75(4), 1190–1197. <https://doi.org/10.1002/ps.5300>
- Ganesan, L. F. (2021). Effects of developmental stage, cold acclimation and diet on the cold tolerance of three species of *Cryptolestes* (Coleóptera: Laemophloeidae). *Journal of Stored Products Research*, 91, 101773–101773. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101773>
- Gao, X. S. (2021). Formulation of nanopesticide with graphene oxide as the nanocarrier of pyrethroid pesticide and its application in spider mite control. *RSC Advances*, 11(57), 36089–36097. <https://doi.org/10.1039/d1ra06505j>
- Gargouri, B. Y. (2018). Inflammatory and cytotoxic effects of bifenthrin in primary microglia and organotypic hippocampal slice cultures. *Journal of Neuroinflammation*, 15(1). <https://doi.org/10.1186/s12974-018-1198-1>
- Gerken, A. R. (2023). Farm2Fork through the lens of community ecology: concepts and applications in postharvest storage. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1137683>
- Gindaba, A. N. (2024). Phytochemical screening and insecticidal activities of some medicinal plants against the maize weevil, *Sitophilus zeamais*

- (Motschulsky) (Coleóptera: Curculionidae). *Scientific Reports*, 14(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-024-59207-z>
- Gitonga, Z. M. (2015). Metal silo grain storage technology and household food security in Kenya. *Journal of Development and Agricultural Economics*, 7(6), 222–230. <https://doi.org/10.5897/jdae2015.0648>
- Giunti, G. P. (2018). VOC emissions influence intra- and interspecific interactions among stored-product Coleóptera in paddy rice. *Scientific Reports*, 8(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-20420-2>
- Greßler, S. H. (2025). A systematic review of nanocarriers used in medicine and beyond — definition and categorization framework. *Journal of Nanobiotechnology*, 23(1), . <https://doi.org/10.1186/s12951-025-03113-7>
- Guedes, R. N. (1997). Biochemical mechanisms of organophosphate resistance in *Rhyzopertha dominica* (Coleóptera: Bostrichidae) populations from the United States and Brazil. *Bulletin of Entomological Research*, 87(6), 581–586. <https://doi.org/10.1017/s0007485300038670>
- Gupta, D. S. (2021). Multifunctional activity of graphene oxide-based nanoformulation against the disease vector, *Aedes aegypti*. *Journal of Applied and Natural Science*, 3(4), 1265–1273. <https://doi.org/10.31018/jans.v13i4.3018>
- Guru, P. N. (2022). A comprehensive review on advances in storage pest management: Current scenario and future prospects [Review of A comprehensive review on advances in storage pest management: Current scenario and future prospects]. . *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.993341>
- Haddi, K. V. (2018). Diversity and convergence of mechanisms involved in pyrethroid resistance in the stored grain weevils, *Sitophilus spp.* *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34513-5>
- Hagstrum, D. W. (2013). Stored product protection. *Kansas State University*. <https://bookstore.ksre.ksu.edu/pubs/S156.pdf>

- Haroun, S. A.-N. (2023). Insecticidal efficiency and safety of zinc oxide and hydrophilic silica nanoparticles against some stored seed insects. . *Journal of Plant Protection Research*. <https://doi.org/10.24425/jppr.2020.132211>
- Huang, Y. G. (2024). Nanotechnology's frontier in combatting infectious and inflammatory diseases: prevention and treatment [Review of Nanotechnology's frontier in combatting infectious and inflammatory diseases: prevention and treatment]. *Signal Transduction and Targeted Therapy*, 9(1) Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s41392-024-01745-z>
- Ibelli, T. M. (2007). Bifenthrin residues in wheat grain and in some of their processed products, and its residual action on *Sitophilus oryzae* (L., 1763), *Sitophilus zeamais* Motsch., 1855 (Coleóptera: Curculionidae) [Universidade de São Paulo]. . In *Digital Library of Theses and Dissertations of the University of São Paulo (Universidade de São Paulo)*.  
<http://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11146/tde-20181127-162030/>
- Iyola, O. A. (2023). DNA barcoding of *Tribolium castaneum* (Coleóptera: Tenebrionidae) from selected states in Nigeria based on mitochondrial DNA sequences. *Notulae Scientia Biologicae Notulae Scientia Biologicae*, 15(4), 11607–11607. <https://doi.org/10.55779/nsb15411607>
- Jasrotia, P. N. (2022). Nanomaterials for Postharvest Management of Insect Pests: Current State and Future Perspectives. *Frontiers in Nanotechnology*, 3.<https://doi.org/10.3389/fnano.2021.811056>
- Jaybhaye, K. N. (2025). A review on nanoformulation in drug delivery. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.17763556>
- Julio, A. H.-T. (2017). Multiple resistance to pirimiphos-methyl and bifenthrin in *Tribolium castaneum* involves the activity of lipases, esterases, and laccase2 Toxicology & pharmacology. *Comparative Biochemistry and Physiology*. <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5629204>

- Kadir, M. L. (2025). Nanopesticides for managing primary and secondary stored product pests: Current status and future directions. *PubMedCentral*, 11(4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42341>
- Khalid-Salako, F. K. (2025). The Nanocarrier Landscape—Evaluating Key Drug Delivery Vehicles and Their Capabilities: A Translational Perspective. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 17(26). <https://doi.org/10.1021/acsami.5c07366>
- Khalil, M. A. (2019). Efficacy of Some Nanoparticles against the Adults of Red Flour Beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) under Laboratory Conditions. *Annals of Agricultural Science Moshtohor*, 57(2), 535–540. <https://doi.org/10.21608/assjm.2019.44940>
- Khandehroo, F. M. (2022). Polymeric nanoparticles containing different oils as insecticides against the storage pest *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleóptera: Tenebrionidae). *Journal of Applied Polymer Science*, 139(41). <https://doi.org/10.1002/app.52982>
- Khoruzhy, L. I. (2022). Adaptive management reporting system in inter-organizational relations of agricultural enterprises according to ESG principles. *Journal of Infrastructure Policy and Development*, 6(2), 1649–1649. <https://doi.org/10.24294/jipd.v6i2.1649>
- Klingler, M. &. (2022). The red flour beetle *T. castaneum*: elaborate genetic toolkit and unbiased large scale RNAi screening to study insect biology and evolution [Review of The red flour beetle *T. castaneum*: elaborate genetic toolkit and unbiased large scale RNAi screening]. *EvoDevo*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/s13227-022-00201-9>
- Kooten, G. C. (2019). Is Commodity Storage an Option for Enhancing Food Security in Developing Countries? *Journal of Agricultural & Food Industrial Organization*, 18(1). <https://doi.org/10.1515/jafio-2019-0054>
- Kusuma, R. A. (n.d.). A Bibliometric Analysis of Post-Harvest Research and Innovations in Tackling Grain Crisis using VOSviewer. *Advances in Biological Sciences Research/Advances in Biological Sciences Research*. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2\\_79](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_79)

- Lampiri, E. Y. (2024). Graphene powders as new contact nanopesticides: Revealing key parameters on their insecticidal activity for stored product insects. *Chemosphere*, 364, 143200–143200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143200>
- Lampiri, E. Y. (2025). Influence of grain types and graphene nanopowder characteristics on insecticidal efficacy against common grain insects. *Discover Nano*, 20(1), 174–174. <https://doi.org/10.1186/s11671-025-04359-8>
- Langridge, P. A.-G. (2022). Meeting the Challenges Facing Wheat Production: The Strategic Research Agenda of the Global Wheat Initiative. *Agronomy*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/agronomy12112767>
- Li, Z. W. (2021). Nanochitin whisker enhances insecticidal activity of chemical pesticide for pest insect control and toxicity. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1). <https://doi.org/10.1186/s12951-021-00792-w>
- Lokeshwari, D. K. (2016). Biochemical Characterization of Detoxifying Enzymes in Dimethoate-Resistant Strains of Melon Aphid, *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae). *Advances in Entomology*, 4(3), 167–182. <https://doi.org/10.4236/ae.2016.43018>
- Magano, D. A. (2021). Efficiency and persistence of insecticides with different action mechanisms applied on wheat stored pest *Sitophilus zeamais*. *Australian Journal of Crop Science*, 618–621. <https://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.05.p2387>
- Manideep, S. B. (2024). Impact of Different Food Sources on the Developmental Biology and Host Preferences of the Red Flour Beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Advances in Biology & Biotechnology*, 27(8), 655–660. <https://doi.org/10.9734/jabb/2024/v27i81180>
- Manna, S. R. (2023). Current and future prospects of “all-organic” nanoinsecticides for agricultural insect pest management. *Frontiers in Nanotechnology*, 4. <https://doi.org/10.3389/fnano.2022.1082128>

- Matsumura, K. &. (2015). Differences in Attack Avoidance and Mating Success between Strains Artificially Selected for Dispersal Distance in *Tribolium castaneum*. *PLoS ONE*, 10(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127042>
- Mavrogenis, M. L. (2023). Effects of dimethoate, an organophosphate insecticide, on photosynthesis of five selected phytoplankton species. *Global NEST Journal*. <https://doi.org/10.30955/gnj.004565>
- Miranda, L. N. (2021). Prospecção Tecnológica de Inseticidas para Controle de *Tribolium Castaneum* em Produtos Armazenados. *Cadernos de Prospecção*, 14(4), 1280–1294. <https://doi.org/10.9771/cp.v14i4.43967>
- Mishra, R. T. (2024). Innovations and Future Trends in Storage Pest Management. *Journal of Experimental Agriculture International*, 46(5), 155–165. <https://doi.org/10.9734/jeai/2024/v46i52366>
- Mokhtar, M. M. (2021). Preliminary Phytochemical Analysis and Biological Evaluation of Some Medicinal Chinese Plant Extracts against *Tribolium castaneum*. *Sains Malaysiana*, 50(8), 2283–2292. <https://doi.org/10.17576/jsm-2021-5008-12>
- Musso, A. P. (2017). Control de insectos en granos almacenados con hongos entomopatógenos. *Americanae (AECID Library)*, 4(2), 79–79. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66066>
- Negi, A. A. (2021). A Molecular Approach for the Detection and Quantification of *Tribolium castaneum* (Herbst) Infestation in Stored Wheat Flour. *Food Technology and Biotechnology*, 59(1). <https://doi.org/10.17113/ftb.59.01.21.6902>
- Oliveira, N. C. (2023). Estudos em Zoologia: aspectos gerais. *In Wissen Editora eBooks*. <https://doi.org/10.52832/wed.57>
- Parajuli, S. A. (2022). Uso de insecticidas biorracionales para el manejo de plagas de insectos de almacenamiento: Una revisión. *Peruvian Journal of Agronomy*, 6(2), 132–146. <https://doi.org/10.21704/pja.v6i2.1767>

- Pérez-Robles, K. Á.-L.-U. (2022). Analysis of variance in water modality for the production of grain maize in Mexico: case of Jalisco, Sinaloa and Nayarit. *Agroindustrial Science*, 12(3), 305–312. <https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2022.03.09>
- Pimentel, M. A. (2005). Eficácia biológica de bifentrina aplicado em milho armazenado sob diferentes temperaturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 9(2), 263–267. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662005000200018>
- Pino-Benitez, N. T.-C. (2024). Repellent and insecticidal activity of four essential oils from plants recollected in Chocó-Colombia against *Tribolium castaneum*. *Boletín Latinoamericano y Del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 23(4), 568–576. <https://doi.org/10.37360/blacpma.24.23.4.38>
- Pires, E. M. (2017). Damage caused by *Tribolium castaneum* (Coleóptera: Tenebrionidae) in Stored Brazil nut. . *Scientific Electronic Archives*, 10(1), 1–5. <https://doi.org/10.36560/1012017418>
- Rigopoulou, M. R. (2023). Evaluation of the susceptibility of *Alphitobius diaperinus* meal to infestations by major stored-product beetle species. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(29), 73628–73635. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27602-0>
- Riudavets, J. P. (2018). Effect of CO2 modified atmosphere packaging on aflatoxin production in maize infested with *Sitophilus zeamais*. . *Journal of Stored Products Research*, 77, 89–91. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.03.005>
- Rivera, S. E. (2026). Nanotecnología para el control de *S. zeamais*, *T. castaneum* y *R. dominica*, insectos plaga de almacenamiento. *Mundo Nano Revista Interdisciplinaria En Nanociencia y Nanotecnología*, 19(37). <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2026.37.69900>
- Romero, A. A.-R.-D. (2019). Crop yield simulations in Mexican agriculture for climate change adaptation. *Atmósfera*. <https://doi.org/10.20937/atm.52430>

- Roque-Enriquez, A. D.-A. (2025). Mortalidad de ninfas de *Bactericera cockerelli* por ingredientes activos químicos potencializados con nanopartículas de grafito. *CienciaUAT*. <https://doi.org/10.29059/cienciauat.v20i1.1979>
- S, A. A. (2019). Comparative bioassay of silver nanoparticles and malathion on infestation of red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *The Journal of Basic and Applied Zoology*, 80(1). <https://doi.org/10.1186/s41936-019-0124-0>
- Samih, M. N. (2017). Effects of Dimethoate Exposure on Locomotor Activity and Anxiety-Like Behavior in Female Wistar Rat. *Journal of Behavioral and Brain Science*, 7(10), 484–496. <https://doi.org/10.4236/jbbs.2017.710034>
- Shah, J. A. (2020). Frass produced by the primary pest *Rhyzopertha dominica* supports the population growth of the secondary stored product pests *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum*, and *T. confusum*. *Bulletin of Entomological Research*, 111(2), 153–159. <https://doi.org/10.1017/s0007485320000425>
- Shaharbano, S. F. (2023). Study on the life cycle of *Tribolium castaneum* (Coleóptera: Tenebrionidae) on different cereals. *Research Square (Research Square)*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2711168/v1>
- Shamjana, U. &. (2021). Review of Insecticide Resistance and Its Underlying Mechanisms in *Tribolium castaneum*. In *IntechOpen eBooks*. *IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100050>
- Shiferaw, B. P. (2011). Crops that feed the world 6. Past successes and future challenges to the role played by maize in global food security. *Food Security*, 3(3), 307–327. <https://doi.org/10.1007/s12571-011-0140-5>
- SIAP, S. D. (2026). Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. [https://nube.agricultura.gob.mx/cierre\\_agricola/](https://nube.agricultura.gob.mx/cierre_agricola/)
- Siegwart, M. T.-B. (2016). Biochemical and Molecular Mechanisms Associated With the Resistance of the European Corn Borer (Lepidoptera: Crambidae) to Lambda-Cyhalothrin and First Monitoring Tool. *Journal of Economic Entomology*. <https://doi.org/10.1093/jee/tow267>

- Silver, K. D. (2014). Voltage-Gated Sodium Channels as Insecticide Targets. *Advances in Insect Physiology*, 389–433. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-417010-0.00005-7>
- Solà, M. R. (2017). Detection and identification of five common internal grain insect pests by multiplex PCR. *Food Control*, 84, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.08.002>
- Stathas, I. G. (2023). The Effects of Insect Infestation on Stored Agricultural Products and the Quality of Food. *Foods*, 12(10), 2046–2046. <https://doi.org/10.3390/foods12102046>
- Stejskal, V. A. (2014). Pest control strategies and damage potential of seed-infesting pests in the Czech stores - a review [Review of Pest control strategies and damage potential of seed-infesting pests in the Czech stores - a review]. *Plant Protection Science*, 50(4), 165–173. <https://doi.org/10.17221/10/2014-pps>
- Tadesse, M. (2020). Post-Harvest Loss of Stored Grain, Its Causes and Reduction Strategies. *Food Science and Quality Management*. <https://doi.org/10.7176/fsqm/96-04>
- Tamilarasan, G. D. (2025). Recent Advances in Stored Grains Pest Management through Eco-Friendly Technologies and Monitoring Tools: A Review. *Journal of Scientific Research and Reports*, 31(5), 336–350. <https://doi.org/10.9734/jsrr/2025/v31i53032>
- Tang, H. Z. (2024). Voltage-gated sodium channel gene mutation and P450 gene expression are associated with the resistance of *Aphis spiraecola* Patch (Hemiptera: Aphididae) to lambda-cyhalothrin. *Bulletin of Entomological Research*, 114(1), 49–56. <https://doi.org/10.1017/s0007485323000603>
- Trematerra, P. S. (2000). Behavioural responses of *Oryzaephilus surinamensis*, *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* to naturally and artificially damaged durum wheat kernels. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 94(2), 195–200. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2000.00619.x>

- Uribe-Rivera, S. E. (2025). Extractos con nano y micropartículas sobre *Sitophilus zeamais* (Coleóptera: Curculionidae). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 16(3). <https://doi.org/10.29312/remexca.v16i3.3633>
- Vadivambal, R. J. (2007). Wheat disinfestation using microwave energy. *Journal of Stored Products Research*, 43(4), 508–514. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2007.01.007>
- Vommaro, M. L. (2024). Anatomical changes of *Tenebrio molitor* and *Tribolium castaneum* during complete metamorphosis. *Cell and Tissue Research*, 396(1), 19–40. <https://doi.org/10.1007/s00441-024-03877-8>
- Wakil, W. K. (2022). Combinations of *Beauveria bassiana* and spinetoram for the management of four important stored-product pests: laboratory and field trials. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10). <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23753-8>
- Wakil, W. K. (2023). Two are better than one: the combinations of *Beauveria bassiana*, diatomaceous earth, and indoxacarb as effective wheat protectants. *Environmental Science and Pollution Research*, , 30(14), 41864–41877. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-25075-1>
- Wakil, W. K. (2024). A winning formula: sustainable control of three stored-product insects through paired combinations of entomopathogenic fungus, diatomaceous earth, and lambda-cyhalothrin. *Environmental Science and Pollution Research*, 1(10), 15364–15378. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31824-1>
- Wakil, W. K. (2025). Efficacy of the Combination of  $\lambda$ -Cyhalothrin and Chlorantraniliprole Against Four Key Storage Pests. *Insects*, 16(4), 387–387. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-31824-1>
- Wang, J. C.-X. (2004). The effect of the insecticide dichlorvos on esterase activity extracted from the psocids, *Liposcelis bostrychophila* and *L. entomophila*. *Journal of Insect Science/Journal of Insect Science*, 4(23), 1–5. <https://doi.org/10.1673/031.004.2301>

- Wang, X. X. (2018). Graphene oxide as a multifunctional synergist of insecticides against lepidopteran insect. *Environmental Science Nano*, 6(1), 75–84. <https://doi.org/10.1039/c8en00902c>
- Winkle, T. V. (2021). Microbial Volatile Organic Compounds from Tempered and Incubated Grain Mediate Attraction by a Primary but Not Secondary Stored Product Insect Pest in Wheat. *Journal of Chemical Ecology*, 48(1), 27–40. <https://doi.org/10.1007/s10886-021-01312-8>
- Xu, M. C. (2019). Supply chain sustainability risk and assessment. *Journal of Cleaner Production*, 225, 857–867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.307>
- Yousef, H. A.-A.-a. (2023). Nanotechnology in pest management: advantages, applications, and challenges. . *International Journal of Tropical Insect Science*, 43(5), 1387–1399. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01053-z>
- Zavala-Zapata, V. A.-U.-B.-J. (2024). Nanopartículas metálicas por síntesis verde y su aplicación como insecticidas . *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 27(2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.5011>