

Evaluación de extractos en combinación con nano y micromateriales para el control de *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae)

Evaluation of extracts in combination with nano and micromaterials for the control of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae)

Saúl Enrique Uribe Rivera¹✉, Ernesto Cerna Chávez^{*2}✉, Yisa María Ochoa Fuentes¹✉, Lisett Romero Pavón¹✉, Jerónimo Landeros Flores¹✉, Edgar Omar Rueda Puente²✉

¹ Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315.

² Departamento de Agricultura y Ganadería. Universidad de Sonora. Blvd. Luis Encinas y Rosales S/N. Col. Centro. C.P. 83000. Hermosillo, Sonora México.

RESUMEN

El barrenador menor del grano *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera:Bostrichidae) representa una amenaza seria a la producción de granos almacenados a nivel mundial, si bien su control se ha ejercido mediante el método químico este genera problemáticas como la resistencia. En la búsqueda de opciones sobresale el empleo de extractos de origen vegetal y su combinación con nano y micro materiales ya que permiten un control efectivo. Se evaluaron dos extractos comerciales de origen vegetal Higer® y Etos®, solos y combinados con nano y micropartículas de silicio, cobre, zinc y grafito. Se empleó la técnica de película residual, se corrigió la mortalidad y los datos se sometieron a un análisis probit. De los nano y micro materiales evaluados, aquel que presentó la mayor reducción del valor de CL_{50} fué el nano silicio. Se concluye que el silicio nano escalado permite la reducción de la CL_{50} comparado con el extracto solo y sus combinaciones con el resto de los materiales. Si bien los límites fiduciales se traslapan se busca la menor CL_{50} de entre todos los tratamientos. El análisis muestra la ecuación de predicción que representa la relación dosis-mortalidad para cada valor de la concentración letal media en cada caso particular.

Palabras clave: Barrenador menor del grano, granos almacenados, nanotecnología.

ABSTRACT

The lesser grain borer *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) represents a serious threat to the production of corn and other stored grains worldwide, and although it has been controlled by chemical methods, it generates problems such as resistance. In the search for options, the use of plant extracts and their combination with nano and micro materials stands out as they allow effective control. Two commercial extracts of plant origin Higer® and Etos®, alone and combined with nano and microparticles of silicon, copper, zinc and graphite, were evaluated. The residual film technique was used, mortality was corrected and the data were subjected to probit analysis. Of the nano and micro materials evaluated, the one that presented the greatest reduction in LC_{50} value was nano silicon. It is concluded that the nanoscaled silicon allows the reduction of the LC_{50} compared

to the extract alone and its combinations with the rest of the materials. Although the fiducial limits overlap, the lowest LC_{50} among all treatments is sought. The analysis shows the prediction equation that represents the dose-mortality relationship for each value of the median lethal concentration in each particular case.

Keywords: Lesser grain borer, stored grains, nanotechnology.

INTRODUCCIÓN

Rhyzopertha dominica (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) es considerado un insecto de gran relevancia económica en el área de granos almacenados, pues se trata de una plaga primaria capaz de afectar productos de almacén, tales como maíz, trigo y frijol (Ren *et al.*, 2023; Hemmati, 2024), gracias a sus capacidades adaptativas y de vuelo, que le permiten detectar potenciales sitios de alimentación (Stevens *et al.*, 2023) moviéndose distancias que van desde los 260 m hasta 1 km, en promedio, por día, (Holloway *et al.*, 2020; Ebadollahi *et al.*, 2022) en función de la respuesta del insecto a los compuestos volátiles detectados provenientes de semilla almacenada (Cao *et al.*, 2024; Naimi *et al.*, 2025), además junto a su eficiente sistema enzimático para hidrolizar el contenido de granos y la probable infestación por plagas secundarias derivada de la presencia de *R. dominica*, constituyen características inherentes al insecto que han propiciado la inversión económica tanto en control como prevención para evitar los daños directos e indirectos ocasionados por larvas y adultos (Solá *et al.*, 2020; Abubakar *et al.*, 2021; Yousuf *et al.*, 2025). Estos pueden ir desde la pérdida de valor comercial, del 3 al 5 % y hasta el 48 % del volumen total de la producción (Wicochea-Rodríguez *et al.*, 2021). Los factores anteriores han favorecido que el método químico sea la principal vía de control del insecto, sin embargo, el empleo constante de ingredientes activos ha propiciado contaminación, riesgo a la salud humana y desarrollo de resistencia por parte de *R. dominica* (Salcedo *et al.*, 2021; Aulicky *et al.*, 2022; Daglish *et al.*, 2024) aumentando la complejidad de las acciones de manejo de la plaga, situación que plantea la necesidad de explorar alternativas que reduzcan estos efectos adversos mediante opciones ecológicas y sustentables (Sakka *et al.*,

*Autor para correspondencia: Ernesto Cerna Chávez

Correo-e: jabaly1@yahoo.com

Recibido: 20 de febrero de 2025

Aceptado: 23 de junio de 2025

Publicado: 17 de julio de 2025

2021; Ramírez-Cabrera *et al.*, 2024). En este sentido los extractos de origen vegetal combinados con materiales nano y micro estructurados ofrecen ventajas sobresalientes como la combinación de modos de acción, reducción de la cantidad de ingrediente activo, liberación controlada y capacidad acarreadora de nano y micropartículas (Sartika *et al.*, 2022; Kudesia *et al.*, 2024; Ileke y Adeniran, 2025; Tirunagaru *et al.*, 2025). Bajo este contexto, materiales nano y micro escalados como silicio, cobre, zinc y grafeno ya han sido evaluados contra plagas de granos de almacén ofreciendo alternativas para establecer acciones de manejo que integren una solución efectiva y ecológica para lograr un control adecuado de las poblaciones de *R. dominica* (Batoool *et al.*, 2020; Sharma *et al.*, 2023; Manivannan *et al.*, 2024; Kadir *et al.*, 2025). Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fué evaluar la actividad insecticida de dos extractos comerciales de origen vegetal, Higuer® y Etos®, solos y combinados con nano y micropartículas de silicio, cobre, zinc y grafito sobre insectos adultos de *R. dominica* buscando aquel tratamiento que presente el menor valor de CL_{50} (concentración letal media).

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del experimento

La investigación se llevó a cabo en el Laboratorio de Toxicología del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buena Vista, Saltillo, Coahuila, México.

Insectos empleados

Los insectos adultos de *R. dominica* fueron donados por el laboratorio de toxicología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, libres de aplicaciones de productos químicos. Se mantuvieron las colonias en granos de maíz con fotoperiodo 12:12 (luz: oscuridad) y humedad relativa (HR) de 35 %, a una temperatura de 35 °C, en jarros cerrados con tela organza con capacidad de 1.5 L.

Extractos, nano y micropartículas

Los extractos empleados Higuer®, elaborado a base higuera (*Ricinus communis* L.) y Etos®, a base de pimienta (*Piper nigrum* L.) y glucosinolatos, así como las nano y micropartículas de silicio, cobre, zinc y grafito, con esferas de 40-80 nanómetros y micropartículas de 100 micras, fueron proporcionadas por la empresa CULTA S.A. de C.V., localizada en Ciudad Mante, Tamaulipas, México.

Bioensayo

Se empleó la técnica de película residual (FAO, 1974), en la cual se impregnó la caja petri con 1 mL de extracto, así como sus combinaciones (mezclas 97 % de extracto y 3 % de material) con nano y micropartículas, con toma de datos a las 24, 48 y 72 h. Se consideró como criterio de muerte aquellos insectos que no respondieron al estímulo de calor, al colocarlos sobre una plancha marca Thermo Fisher Scientific-Cimarec, a una temperatura de 30 °C. Como control se emplearon unidades experimentales impregnadas con 1 mL de agua estéril.

Arreglo del experimento y análisis estadístico

Se empleó un diseño experimental completamente al azar, con 6 concentraciones más testigo para cada extracto solo y su combinación con cada tipo de nano y micropartícula, con 3 repeticiones por concentración y 30 insectos por unidad experimental, empleando un total de 540 insectos por tratamiento. Las concentraciones empleadas fueron establecidas con base en el estudio previo de ventana biológica. Las nano y micropartículas se mezclaron con cada uno de los extractos a la concentración de 3 %. La unidad experimental consistió en la caja petri donde se colocaron los 30 insectos adultos de *R. dominica*.

Los datos de mortalidad fueron corregidos, según el caso, mediante la fórmula de Abbott (1925) a continuación: % Mortalidad = $100 (\% \text{ muertos tratamiento} - \% \text{ muertos control}) / 100 - \% \text{ muertos control}$, y con ellos se estimó la CL_{50} por medio de un análisis probit (Finney, 1971) mediante el método de máxima verosimilitud, empleando el programa estadístico SAS System for Windows, versión 9.0 (SAS, 2002). En este análisis estadístico se muestran los resultados de la CL_{50} para cada uno de los tratamientos, así mismo nos muestra los límites fiduciales al 95 % de confianza, tanto superior como inferior, los límites representan el rango de posibles valores para la CL_{50} de tal manera que de cada 100 veces que se realice el experimento, bajo las mismas condiciones, 95 caerán dentro de ese rango de valores, mientras que las ecuaciones de predicción nos muestran la relación dosis-mortalidad. Cada ecuación representa un gráfico de valores ajustados generados automáticamente por el programa al momento de ejecutar el análisis de máxima verosimilitud.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos para los valores de CL_{50} del extracto Higuer® y sus combinaciones con nano y micro materiales sobre los adultos de *R. dominica*. En cuanto a la combinación con nano partículas es posible observar cómo la mezcla con silicio obtuvo el valor más bajo (141.88 ppm) comparado con el extracto solo (183.74 ppm), seguido de los valores de cobre (166.96 ppm), grafito (171.19 ppm) y zinc (179.17 ppm).

El extracto solo de *R. communis* ha sido catalogado como herramienta efectiva para el control de adultos de *R. dominica* tal como lo realizó Habib-Ur *et al.* (2018) donde evaluaron los extractos de las plantas *Citrus paradise* L., *Jatropha curcus* M. y *R. communis*, sobresaliendo esta última con una mortalidad de 59.5 % a las 72 h, a una concentración de 1500 ppm, valor que resulta superior al obtenido en el presente trabajo (183.74 ppm). Contrastando con el valor del extracto Higuer® solo, Corral *et al.* (2017) obtuvieron mortalidades del 100 % a las 72 h con aceite esencial solo de *R. communis* sobre *R. dominica* en concentraciones de 25, 50 y 80 ppm, concluyendo que el aceite esencial de la planta de higuera constituye una herramienta viable y no perjudicial con el medio ambiente cuando es aplicado sobre los adultos de esta especie.

Tabla 1. Concentración letal media, límites fiduciales y ecuación de predicción para *R. dominica* con el extracto Higuer® y sus combinaciones con nano y micropartículas.**Table 1.** Mean lethal concentration, fiducial limits and prediction equation for *R. dominica* with Higuer® extract and its combinations with nano and microparticles.

Extracto Higuer ®		CL ₅₀ ppm	LFI-LFS	Ecuación de predicción
Solo		183.74	136.596 - 249.831	Y= -9.819 ± 4.336
	Si	141.88	56.455 - 331.908	Y= -12.862 ± 5.822
Nanopartículas	Cu	166.96	77.640 - 296.944	Y= -12.400 ± 5.579
	Zn	179.17	129.223 - 250.143	Y= -9.864 ± 4.367
	Gr	171.79	101.949 - 267.766	Y= -11.789 ± 5.274
	Si	168.55	128.803 - 246.778	Y= -9.986 ± 4.434
Micropartículas	Cu	182.73	130.582 - 256.488	Y= -10.120 ± 4.472
	Zn	188.32	135.850 - 286.986	Y= -9.429 ± 4.161
	Gr	179.15	129.088 - 251.018	Y= -10.727 ± 4.761

CL₅₀ = Concentración letal media, LFI = Límite fiducial inferior; LFS límite fiducial superior (95 %), ppm = partes por millón. Si = silicio, Cu = cobre, Zn = zinc, Gr = grafito.

El extracto de *R. communis* nano formulado también se ha evaluado contra insectos plaga de granos de almacén, logrando un control efectivo, con mortalidades de 100 % a 1300 y 25000 ppm, solo y nanoformulado, respectivamente, contando con significativo efecto insecticida sobre *Tribolium castaneum*, a la especie *R. dominica* y al género *Sitophilus* spp. (El-Naby *et al.*, 2020).

En la Tabla 2 se muestran los valores estimados para las CL₅₀ del extracto Etos® solo y sus combinaciones con nano y micro materiales. Se determinó que, de todos los materiales, la combinación con nano partículas de silicio presentó el menor valor con 163.63 y 195.17 ppm del extracto solo, seguido por nano partículas de cobre (168.66 ppm), nano grafito (175.91 ppm) y nano zinc (196.57 ppm).

En el control de *R. dominica* el extracto de *P. nigrum* ha sido empleado con resultados satisfactorios, tal como lo publicó Sleem (2021) donde evaluó el extracto de la planta contra el insecto y registró mortalidades de hasta 52 % a 2500 ppm, valor que resulta superior al reportado en el pre-

sente trabajo (195.17 ppm). Para el caso de *P. nigrum* nanoformulado Rajkumar *et al.* (2020) evaluaron aceite esencial solo y en nanoformulación con quitosano sobre *T. castaneum*, mostrando que hubo una reducción del valor de CL₅₀ así como elevado efecto insecticida, mismo que potencialmente podría ser aplicado sobre plagas como *R. dominica*, *Sitophilus oryzae* (L.) y *Sitophilus zeamais* (M.).

Para el caso de las nanopartículas de silicio, Ziaee y Ganjii (2016) las evaluaron contra *R. dominica* y obtuvieron mortalidad de 100 % a una CL₅₀ de 102 ppm, valor que resulta inferior a la combinación de los extractos con nano silicio, 141.88 y 163.33 ppm, para Higuer® y Etos®, respectivamente. Por su parte Salem, 2020 evaluó tres tipos de nanopartículas de silicio contra *R. dominica*, donde registró mortalidades de 100 % desde las 500 a las 1500 ppm, indicando el potencial que estas tienen para controlar al insecto y que pueden coadyuvar en el uso de nano formulados, coincidiendo con los resultados obtenidos en este trabajo para dicho material, pues redujeron el valor de CL₅₀ al ser combinadas con los

Tabla 2. Concentración letal media, límites fiduciales y ecuación de predicción para *R. dominica* con el extracto Etos® y sus combinaciones con nano y micropartículas.**Table 2.** Mean lethal concentration, fiducial limits and prediction equation for *R. dominica* with Etos® extract and its combinations with nano and microparticles.

Extracto Etos ®		CL ₅₀ ppm	LFI-LFS	Ecuación de predicción
Solo		195.17	139.432 - 293.262	Y= -8.891 ± 3.882
	Si	163.63	54.631 - 346.616	Y= -12.862 ± 5.772
Nanopartículas	Cu	168.66	106.928 - 245.896	Y= -11.773 ± 5.286
	Zn	196.57	140.896 - 301.026	Y= -8.798 ± 3.836
	Gr	175.91	128.167 - 238.003	Y= -10.688 ± 4.760
	Si	182.57	135.823 - 247.106	Y= -9.934 ± 4.392
Micropartículas	Cu	192.47	139.315 - 279.967	Y= -9.084 ± 3.976
	Zn	200.92	128.356 - 330.563	Y= -8.525 ± 3.701
	Gr	193.81	139.404 - 286.275	Y= -8.987 ± 3.929

CL₅₀ = Concentración letal media, LFI = Límite fiducial inferior; LFS límite fiducial superior (95 %), ppm = partes por millón. Si = silicio, Cu = cobre, Zn = zinc, Gr = grafito.

dos extractos. Así mismo El-Naggar *et al.* (2020) evaluaron su actividad insecticida de este tipo de nanopartículas y determinaron que son efectivas por sí solas contra *R. dominica*, *Tribolium castaneum* (Herbst) y *Oryzaephilus surinamensis* L., concluyendo que combinadas con un extracto o ingrediente activo pueden potencializar su efecto debido a las propiedades nano acarreadoras de los materiales nano escalados.

Respecto a las nanopartículas de cobre Badawy *et al.* (2021) evaluaron nanopartículas de cobre bio sintetizadas a partir de una línea de *Aspergillus niger* (G3-1) obteniendo mortalidades de hasta 90 % a 300 ppm, señalando que son efectivas en el control de *R. dominica*.

En cuanto a nano zinc Aziz *et al.* (2022) determinaron la actividad insecticida sobre *R. dominica* de nanopartículas de óxido de zinc, plata y selenio, reportando mortalidades de 47 a 100 % a los 9 días de evaluación, concluyendo que los tres materiales representan una alternativa viable en el control del insecto, sin embargo, las nanopartículas de plata fueron más efectivas que las de zinc y por último selenio. Similar a ello Siddique *et al.* (2022) evaluaron el extracto de *Eucalyptus globulus* L. solo y combinado con nanopartículas de zinc contra *R. dominica*, estimando una CL_{50} de 1043.6 y 202.11 ppm, respectivamente, determinando que en nanoformulación la CL_{50} se redujo considerablemente con un remarcado efecto insecticida. Contrastando con lo anterior se ha descrito que el zinc en formas nano y micro escalado, no es tan efectivo como silicio, cobre, plata y hierro en el control de plagas de almacén (Gupta *et al.*, 2023; Albandar *et al.*, 2024).

En investigaciones recientes se ha demostrado como la adición de nano grafeno a las formulaciones bio insecticidas logra reducir los valores de CL_{50} , tal como lo realizaron Batool *et al.* (2020) donde evaluaron una cisteína proteasa proveniente de *Albizia procera* L. encapsulada y sin encapsular en Graphene Quantum Dots (GQD), obteniendo mortalidad de hasta 92 % para *R. dominica* logrando reducir el valor de CL_{50} en nano formulación con grafeno comparado con la biomolécula sola (0.449 ppm y 0.501 ppm). Así mismo Moisis *et al.* (2022) evaluaron dos tipos de nano grafeno, si bien el grafeno es un material de dos dimensiones, que posee una sola capa de átomos de carbono organizados de manera hexagonal, los autores emplearon dos tipos de nano grafeno denominados Gr-1 y Gr-2, que se diferenciaban en el número de capas y defectos, así como en el carbono sp^2 , esto derivado del proceso comercial de elaboración a partir de gas natural, contra *R. dominica*, concluyendo que se trata de un nano material efectivo para controlar a dicho insecto, pues obtuvieron mortalidades del 100 % a 250 ppm. Similar a esta investigación, Lampiri *et al.* (2024) realizaron la evaluación de nano y micro grafeno (100 nm y 5, 10 y 25 μm) sobre *R. dominica*, donde el material nano escalado proporcionó mortalidades de 96.6 a 99 % comparado con una máxima de 20 % con micropartículas de grafeno, atribuyéndolo a las propiedades nanoacarreadoras de las nanopartículas.

En los resultados mostrados en las tablas, es posible observar el traslape de los límites fiduciales, estadísticamente iguales, sin embargo se buscó entre las respectivas combi-

naciones con los materiales nano y micro escalados aquellos tratamientos con el menor valor de CL_{50} , brindando de esta manera una reducción de dicho valor respecto del extracto solo.

Referente a los micro materiales existen diferencias en propiedades respecto a los materiales nano escalados, tales como capacidad acarreadora, mejor adhesión a la cutícula del insecto, liberación controlada y prolongada del ingrediente activo así como protección contra la degradación (Iqbal *et al.*, 2022) situación que podría explicar los resultados obtenidos en la presente investigación al comparar los valores estimados de las CL_{50} de los nano materiales contra sus contrapartes micro escalados, ya que los primeros reducen dicho valor. Además, los diferentes modos de acción podrían influir en la respuesta obtenida, ya que el silicio actúa por el proceso conocido como fisiorción, donde las ceras cuticulares, mismas que protegen a los insectos de la desecación, se ven afectadas, permitiendo el paso de los ingredientes activos y generando como consecuencia pérdida de agua, que culmina con la muerte del insecto (El Sayed *et al.*, 2023). Convirtiéndose de esta manera en un nano material sobresaliente, por encima de otros como cobre o zinc, en el control de insectos plaga de almacén gracias a su capacidad acarreadora y compatibilidad con diversidad de moléculas (Saw *et al.*, 2023). En cuanto a cobre y zinc su modo de acción ha sido descrito como generadores de estrés oxidativo al crear un desbalance entre las especies reactivas de oxígeno y los mecanismos de defensa antioxidantes del insecto (Rai *et al.*, 2018). Para grafito, al ser un material similar al grafeno, su modo de acción ha sido descrito como abrasión y sorción de lípidos cuticulares (Athanasios *et al.*, 2018), sin embargo se ha señalado que su efectividad podría variar dependiendo de su estructura atómica (Dasauni *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

Los extractos Higuer® y Etos® combinados con las nanopartículas de silicio presentan los valores más bajos de CL_{50} , por lo que constituyen una herramienta para el control de *R. dominica*.

Cuando los extractos son combinados con los materiales micro particulados los valores de CL_{50} son iguales o superiores a los de los productos solos.

AGRADECIMIENTOS

A la SECIHTI por el apoyo de beca otorgado para cursar los estudios de doctorado.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

REFERENCIAS

- Abbott, W.S. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18(2): 265–267.



- Abubakar, R., Suleiman, M. y Wagini, N.H. 2021. Phytochemical and insecticidal properties of some botanical extracts against the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae). Journal of Entomology and Zoology Studies. 9(2):06–13. <https://doi.org/10.22271/j.ento.2021.v9.i2a.8452>
- Albandar, I., Alyusif, M.J. y Almansour, N.A.A. 2024. Comparative analysis of the insecticidal activity of biogenic zinc oxide nanoparticles, iron oxide nanoparticles and *Piper nigrum* fruits extract against 1st instar larva of house fly, (*Musca domestica*) (Diptera: Muscidae). Journal of Bioscience and Applied Research. 1(1): 1–15. <https://dx.doi.org/10.21608/jbaar.2024.326210.1090>
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Benelli, G., Losic, D., Usha Rani, P. y Desneux, N. 2018. Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. Journal of Pest Science. 91(1): 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10340-017-0898-0>
- Aulicky, R., Stejskal, V., Frydova, B. y Athanassiou, C. 2022. Evaluation of phosphine resistance in populations of *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* and *Rhyzopertha dominica* in the Czech Republic. Insects. 13(12): 1162. <https://doi.org/10.3390/insects13121162>
- Aziz, D.J.M., Haidir, A.A. y Mustafa, T.A. 2022. Effect of nanoparticles on some biological aspects of the lesser grain borer beetle *Rhyzopertha Dominica* (Fab.) (Coleoptera: Bostrichidae). NVEO-Natural Volatiles & Essential Oils Journal| NVEO, 1(1): 487–500.
- Badawy, A.A., Abdelfattah, N.A., Salem, S.S., Awad, M.F. y Fouda, A. 2021. Efficacy assessment of biosynthesized copper oxide nanoparticles (CuO-NPs) on stored grain insects and their impacts on morphological and physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. Biology. 10(3): 233. <https://doi.org/10.3390/biology10030233>
- Batool, M., Hussain, D., Akrem, A., Najam-ul-Haq, M., Saeed, S., Zaka, S.M. y Saeed, Q. 2020. Graphene quantum dots as cysteine protease nanocarriers against stored grain insect pests. Scientific reports. 10(1): 3444. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60432-5>
- Cao, Y., Jian, L., Athanassiou, C.G., Yang, Y., Hu, Q., Zhang, X. y Maggi, F. 2024. Behavioral responses of *Rhyzopertha dominica* (F.) to volatiles of different stored grains. Journal of Stored Products Research. 105(1): 102235. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2023.102235>
- Corral, F.J.W., Villanueva, M.C.M., Vásquez, F.V., López, E.A.B., Torres, F.A.C., Heredia, S.M.B., ... y Puente, E.O.R. 2017. Aceite de *Ricinus Communis* (L.) para el control de *Rhyzopertha dominica* (F.) en trigo *Triticum Aestivum* (L.) almacenado. Biotecnia. 19(1):23–26.
- Daglish, G.J., Singarayan, V.T., Jagadeesan, R., Reid, R., Ebert, P.R. y Nayak, M.K. 2024. Seasonal flight activity and associated frequency of rph2 phosphine resistance allele in *Rhyzopertha dominica* at bulk storage facilities in southern Queensland, Australia. Journal of Stored Products Research, 109 (1): 102447. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102447>
- Dasauni, K., Mathpal, P. y Nailwal, T. K. 2022. Polymeric nanoparticle-based insecticide: A critical review of agriculture production. Nano-enabled Agrochemicals in Agriculture. 1(1): 445–466. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91009-5.00015-X>
- Ebadollahi, A., Naseri, B., Abedi, Z. y Setzer, W.N. 2022. Chemical profiles and insecticidal potential of essential oils isolated from four Thymus species against *Rhyzopertha dominica* (F.). Plants. 11(12): 1567. <https://doi.org/10.3390/plants11121567>
- El-Naby, A., Shima, S.I., Mahmoud, F.H., El-Habal, N.A., Abdou, M.S. y Abdel-Rheim, K.H. 2020. Efficacy of prepared castor oil nanoemulsion formulation against rice weevil *Sitophilus Oryzae* on stored wheat grain and its acute toxic effect on rats. Egyptian Scientific Journal of Pesticides. 6(4): 33–44.
- El-Naggar, M.E., Abdelsalam, N.R., Fouda, M.M., Mackled, M.I., Al-Jaddadi, M.A., Ali, H.M. y Kandil, E.E. 2020. Soil application of nano silica on maize yield and its insecticidal activity against some stored insects after the post-harvest. Nanomaterials. 10(4):2–19 <http://dx.doi.org/10.3390/nano10040739>
- El-Sayed, T.S., Rizk, S.A. y Sayed, R.M. 2023. Cellophane packaging treated with nano silica is superior to polyethylene in reducing stored irradiated flour from *Tribolium confusum* infestation. International Journal of Tropical Insect Science. 43(6): 2121–2127. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01111-6>
- Finney, D.J. 1971 En Probit Analysis. Cambridge at the Univ. Press. pp. 120. 3rd Ed.
- Food and Agriculture Organization. 1974. Recommended methods for the detection and measurement of the resistance of agricultural pests to pesticides. FAO plant protection bulletin 27. 18(6): 29–32.
- Gupta, R., Saxena, T., Mehra, N., Arora, R. y Sahgal, A. 2023. Nanopesticides: promising future in sustainable pest management. Journal of Advanced Applied Scientific Research. 5(2):1–6. <https://doi.org/10.46947/joaasr522023515>
- Habib-Ur, R., Mansoor-ul-Hasan, M.U.H., Qurban Ali, Q.A., Muhammad Yasir, M.Y., Shahzad Saleem, S.S., Saima Mirza, S.M. y Ahmed, H.M. 2018. Potential of three indigenous plants extracts for the control of *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Rhyzopertha dominica* (Fab.) Pakistan Entomologist. 40(1): 31–37.
- Hemmati, S.A. 2024. The performance and physiological responses of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) to different sorghum cultivars. Journal of Stored Products Research. 107(1): 102318. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102318>
- Holloway, J.C., Daglish, G.J. y Mayer, D.G. 2020. Spatial distribution and flight patterns of two grain storage insect pests, *Rhyzopertha dominica* (Bostrichidae) and *Tribolium castaneum* (Tenebrionidae): implications for pest management. Insects. 11(10): 715. <https://doi.org/10.3390/insects11100715>
- Ileke, K.D. y Adeniran, C.O. 2025. Chemical composition and insecticidal efficacy of two animals' horn and hoof crude extracts against lesser grains borer, *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). Heliyon. 11(2):1–16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41778>
- Iqbal, H., Jahan, N., Khalil-ur-Rahman y Jamil, S. 2022. Formulation and characterisation of *Azadirachta indica* nanobiopesticides for ecofriendly control of wheat pest *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica*. Journal of Microencapsulation. 39(7-8): 638–653. <https://doi.org/10.1080/02652048.2022.2149870>

- Kadir, M.L., Dageri, A. y Aslan, T.N. 2025. Nanopesticides for managing primary and secondary stored product pests: current status and future directions. *Heliyon*. 11(4):1–19. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42341>
- Kudesia, N., Banu, A.N., Raut, A.M., Rana, N., Bihal, R., Sarkar, R. y Wahengbam, J. 2024. Insect pest control through biofabricated technology. In *Entomopathogenic Fungi: Prospects and Challenges*, pp. 523–553. Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-5991-0_21
- Lampiri, E., Yap, P.L., Berillis, P., Athanassiou, C.G. and Losic, D. 2024. Graphene powders as new contact nanopesticides: Revealing key parameters on their insecticidal activity for stored product insects. *Chemosphere*. 364(1): 143200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143200>
- Manivannan, S., Subramanyam, B. y Siliveru, K. 2024. Efficacy of two amorphous silica powders applied to soft red winter wheat against the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research*. 106(1): 102264. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2024.102264>
- Moisidis, I.C., Sakka, M.K., Karunakaran, R., Losic, D. y Athanassiou, C.G. 2022. Insecticidal effect of graphene against three stored-product beetle species on wheat. *Journal of Stored Products Research*. 98(1): 101999. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101999>
- Naimi, I., Bouamama, H. y Ba M'hamed, T. 2025. Chemical composition, repellency, and insecticidal activity of *Pinus halepensis* leaf essential oil from Morocco on adults of *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Tribolium castaneum* (Herbst)(Coleoptera: Tenebrionidae). *Plants*. 14(3): 407–422. <https://doi.org/10.3390/plants14030407>
- Rai, M., Ingle, A.P., Pandit, R., Paralakar, P., Shende, S., Gupta, I. y da Silva, S.S. 2018. Copper and copper nanoparticles: Role in management of insect-pests and pathogenic microbes. *Nanotechnology Reviews*. 7(4): 303–315. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2018-0031>
- Rajkumar, V., Sindhu, M., Annappoorani, C.A., Gunasekaran, C. y Kannan, M. 2020. Functionalized nanoencapsulated *Curcuma longa* essential oil in chitosan nanopolymer and their application for antioxidant and antimicrobial efficacy. *International Journal of Biological Macromolecules*. 251(1): 126387. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2020.104566>
- Ramírez-Cabrera, C., López-Díaz, G., Canal, N.A. y Bacca, T. 2024. Control failure of deltamethrin in Colombian populations of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Revista de Ciencias Agrícolas*. 41(1): e11229. <https://doi.org/10.22267/rcia.20244101.229>
- Ren, Y., Wang, T., Wang, C., D'Sita, I., Hu, Q., Germinara, G.S. y Cao, Y. 2023. Population development of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) on different stored products. *Entomological Research*. 53(10): 359–366. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12670>
- Sakka, M.K., Riga, M., Ioannidis, P., Baliota, G.V., Tselika, M., Jagadeesan, R. y Athanassiou, C.G. 2021. Transcriptomic analysis of s-methoprene resistance in the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica*, and evaluation of piperonyl butoxide as a resistance breaker. *BMC genomics*. 22 (1): 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12864-020-07354-8>
- Salcedo Ortega, D., Bacca, T., Silva, A.P.N., Canal, N.A. y Haddi, K. 2021. Control failure and insecticides resistance in populations of *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) from Colombia. *Journal of Stored Products Research*. 92(1): 101802. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101802>
- Salem, A.A. 2020. Comparative insecticidal activity of three forms of silica nanoparticles on some main stored product insects. *Journal of Plant Protection and Pathology*. 11(4): 225–230. <https://doi.org/10.21608/jppp.2020.9600>
- Sartika, P.D., Astuti, L.P. y Rahardjo, B.T. 2022. Bioactivity of bay leaf as botanical fumigant against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Entomological Research*. 46(3): 500–504. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-4576.2022.00088.3>
- SAS (2002) Statistical Analysis System: Version 9.0. SAS Institute Inc. Cary.
- Saw, G., Nagdev, P., Jeer, M. y Murali-Baskaran, R.K. 2023. Silica nanoparticles mediated insect pest management. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 194(1): 105524. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105524>
- Sharma, U., Sanjta, S. y Sharma, S.K. 2023. Nanopesticides: an approach towards precision insect-pest management in agriculture. *Journal of Entomological Research*. 47(2): 288–294. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-4576.2023.00051.8>
- Siddique, M.A., Hasan, M.U., Sagheer, M. y Sahi, S.T. 2022. Comparative toxic effects of *Eucalyptus globulus* L.(Myrtales: Myrtaceae) and its green synthesized zinc oxide nanoparticles (ZnONPs) against *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *International Journal of Tropical Insect Science*. 42(1): 1697–1706. <https://doi.org/10.1007/s42690-021-00691-5>
- Sleem, F.M.A. 2021. Insecticidal effect of *Piper Nigrum* L. (Pipeaceae) and *Prunus cerasus* L. (rosaceae) seeds extract against *Rhyzopertha dominica* F. (Coleoptera: bostrichidae). *International Journal of Advance and Innovative Research*. 9(3): 245–252.
- Solá, M., Riudavets, J. y Castañé, C. 2020. Control of *Rhyzopertha dominica* and *Sitophilus zeamais* in stored rice with different release rates of the larval parasitoid *Anisopteromalus calandrae*. *Entomologia Generalis*. 40(3): 323. <https://doi.org/10.1127/entomologia/2020/0899>
- Stevens, M.M., Daglish, G.J., Orchard, B.A., Warren, G.N., Mo, J. y Hoskins, J.L. 2023. Flight activity and dispersal of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae) and *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) across a mixed agricultural landscape in southern Australia. *Journal of Stored Products Research*. 100(1): 102060. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.102060>
- Tirunagaru, K.C., Desai, S. y Singh, I. R. 2025. Nano technological approaches for the management of stored insect-pests: Present scenario and future prospects. En *Sustainable Development Goals Towards Environmental Toxicity and Green Chemistry*, pp. 249–267. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-77327-3_13
- Wicochea-Rodríguez, J.D., Rigou, P., Lullien-Pellerin, V. y Chalié, P. 2021. A new green insecticide for stored wheat grains: Efficiency against *Rhyzopertha dominica* and risk assessment. *Journal of Cereal Science*. 101 (1): 103312. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2020.101750>

Yousuf, H.M.B., Yasin, M., Khan, M.A., Abbasi, A., Arshad, M., Aqueel, M.A., ... y Ali, H.M. 2025. Assessment of different conventional and biofortified wheat genotypes based on biology and damage pattern of *Rhyzopertha dominica* and *Trogoderma granarium*. *Insects*. 16(1): 66. <https://doi.org/10.3390/insects16010066>

Ziaee, M. y Ganji, Z. 2016. Insecticidal efficacy of silica nanoparticles against *Rhyzopertha dominica* F. and *Tribolium confusum* Jacquelin du Val. *Journal of Plant Protection Research*. 56(3): 250–256.