

Ensayo de Investigación

Nanopartículas de dióxido de silicio y extractos vegetales para el control de insectos plaga de granos almacenados

Silicon dioxide nanoparticle and vegetable extracts for the control of insects pests of stored grains

Saúl Enrique Uribe Rivera¹, Yisa María Ochoa Fuentes¹
Edgar Omar Rueda Puente², Ernesto Cerna Chávez^{1*}

¹Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
²Departamento de Agricultura y Ganadería
Universidad de Sonora

Autor de correspondencia:
*jabaly1@yahoo.com

Recibido: 21-01-2024 Aceptado: 02-09-2024 (Artículo Arbitrado)

Resumen

La agricultura moderna enfrenta desafíos como minimizar el impacto negativo de los insecticidas químicos sintéticos y una alternativa potencial es el uso de nanopartículas como agentes controladores de insectos plaga dada su actividad insecticida. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto insecticida de ocho extractos vegetales, cuatro solos y cuatro con nanopartículas de dióxido de silicio, sobre los insectos adultos de *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* y *Tribolium castaneum*. Se determinaron los valores de CL_{50} (concentración letal media) de los extractos para cada especie de insecto, mismos que en *S. zeamais* fueron los más bajos y se obtuvieron con los cuatro extractos con nanopartículas de dióxido de silicio, para *T. castaneum* solo Higuier Nano® y Etos Nano® presentaron valores menores de CL_{50} . Contrariamente, en *R. dominica* los valores más bajos de CL_{50} se obtuvieron con los extractos sin nanopartículas.

Palabras clave: Extractos, plagas de granos almacenados, nanopartículas de silicio, nanotecnología.

Abstract

Modern agriculture faces challenges such as minimizing the negative impact of synthetic chemical insecticides and a potential alternative is the use of nanoparticles as insect pest control agents due to their insecticidal activity. The objective of this research was to evaluate the insecticidal effect of eight plant extracts, four alone and four with silicon dioxide nanoparticles respectively, on adult insects of *Sitophilus zeamais*, *Rhyzopertha dominica* and *Tribolium castaneum*. The LC_{50} (mean lethal concentration) values of the extracts were determined for each insect species, which in *S. zeamais* were the lowest and were obtained with the four extracts with silicon dioxide nanoparticles; for *T. castaneum* only Higuier Nano® and Etos Nano® presented lower LC_{50} values. In contrast, for *R. dominica* the lowest LC_{50} values were obtained with the extracts without nanoparticles.

Keywords: Extracts, stored grain pests, silica nanoparticles, nanotechnology.

Introducción

Los insectos de almacén causan daños desde la cosecha hasta el almacenamiento de los granos, contribuyendo significativamente a la crisis alimentaria a nivel mundial (Golden, Quinn, Shaaya, Kostyukovsky & Poverenov, 2017; Kumar & Kalita, 2017). La pérdida en producción de granos destinados a la alimentación de la población mundial, por insectos plaga de granos almacenados se estima entre un 10 a un 40 % (Asrar, Ashraf, Hussain & Rasool, 2016). El gorgojo castaño de la harina *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) (Coleoptera: Tenebrionidae), el barrenador

menor de los granos *Rhyzopertha dominica* (Fabricius, 1792) (Coleoptera: Bostrichidae) y el gorgojo del maíz *Sitophilus zeamais* (Motschulsky, 1855) (Coleoptera: Curculionidae) son considerados como los más destructivos a nivel mundial por causar daños económicos significativos (Edde, 2012; Chen, Schlipalius & Philips, 2015; Patiño-Bayona et al., 2021). Estos insectos afectan el valor nutricional, viabilidad de semilla, el valor de mercado y la reducción del peso seco de los granos (Sleem, 2021). *S. zeamais* y *R. dominica* son perforadores de granos (Nwosu, 2018;

Scheff, Campbell & Arthur, 2022), mientras que *T. castaneum* usualmente se alimenta de granos dañados (Deshwal, Vaibhav, Kumar & Singh, 2020). Aunque los hábitos alimenticios de estas tres especies difieren, comparten algunas características como distribución cosmopolita (Upadhyay, Dwivedy, Kumar, Prakash & Dubey, 2018; Quellhorst, Athanassiou, Bruce, Scully & Morrison III, 2020 y Sleem, 2021), la capacidad de infestar diversos granos como arroz, trigo, cebada, sorgo y frutos secos. Adicionalmente *S. zeamais* es capaz de infestar algunos subproductos como pasas y chocolate, mientras que *T. castaneum* puede afectar legumbres y especias. (Edde, 2012; Maggioni, Silva, Xavier, Munhae & Dourados, 2016). Estas tres especies, presentan un alto potencial reproductivo y adaptabilidad en ambientes diversos como molinos de harina, graneros y plantas procesadoras (Mahroof & Hagstrum, 2012; Pires & Nogueira, 2018). El control de estos insectos se basa en la aplicación de insecticidas químicos (Attia et al., 2020). Sin embargo, su uso intensivo impacta negativamente al medio ambiente, la salud humana y a los organismos no objetivo, lo que puede derivar en la aparición de poblaciones de insectos resistentes, por lo que la eficacia de éstos se ve afectada (De Andrade, Silva, Santoro & Badji, 2018; Sparks, Storer, Porter, Slater y Nauen, 2021).

Por lo tanto, es necesario generar estrategias alternativas para el control de plagas de granos almacenados, que sean más eficaces y amigables con el medio ambiente. Una herramienta novedosa que permite desarrollar nuevos insecticidas es la nanotecnología, mediante la modificación del uso y dosificación de los plaguicidas tradicionales (Shukla et al., 2019). El uso de insecticidas nano formulados se ha propuesto para controlar insectos plaga, tanto en campo como en almacén (Jasrotia et al., 2022). Se ha demostrado que las nanopartículas de dióxido de silicio tienen elevada estabilidad térmica, baja toxicidad y poseen una excelente biocompatibilidad con un amplio rango de moléculas como aceites esenciales e ingredientes activos químicos y pueden actuar como nanoacarreadores de agroquímicos, bio-plaguicidas, feromonas y sustancias promotoras del crecimiento (Huang et al., 2019; Rastogi et al., 2019). Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación consistió en evaluar el efecto insecticida de ocho extractos vegetales comerciales, cuatro solos y cuatro adicionados con nanopartículas de dióxido de silicio sobre insectos adultos de *S. zeamais*, *R. dominica* y *T. castaneum*.

Desarrollo

Ubicación del experimento

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

Productos evaluados

Se evaluaron ocho extractos vegetales comerciales, cuatro sin nanopartículas: Higuer® (Extracto de higuerilla), Haarp® (Extracto de chicalote), Azeem® (Extracto de neem) y Etos® (Extracto de chile y pimienta) y cuatro con nanopartículas: Higuer Nano®, Haarp Nano®, Azeem Nano® y Etos Nano®, proporcionados por la empresa CULTA S.A de C.V., localizada en ciudad Mante, Tamaulipas, México.

De cada extracto vegetal se evaluaron seis concentraciones contra los insectos adultos de *S. zeamais*, *R. dominica* y *T. castaneum*. Previamente se realizó el estudio de ventana biológica para cada especie de insecto y cada extracto.

Material biológico

Las colonias de cada especie fueron obtenidas de crías establecidas en el Departamento de Parasitología agrícola de la UAAAN. Para este propósito, se seleccionaron cohortes de 500 adultos de cada insecto (*T. castaneum*, *R. dominica* y *S. zeamais*). Los individuos de *T. castaneum* se alimentaron con harina de trigo, mientras que *R. dominica* y *S. zeamais* se alimentaron con granos de maíz. Las tres especies se mantuvieron bajo condiciones controladas; *T. castaneum* se mantuvo a 35 °C, con una humedad relativa (HR) de 40 a 50 %, *R. dominica* a 28 °C, con una HR de 65 %. Mientras que, *S. zeamais* se mantuvo a 35 °C, con una HR de 65 %. Las tres especies contaron con un fotoperiodo de 12:12 (L:O).

Técnica de bioensayo

La técnica de bioensayo empleada fue de película residual (FAO, 1974) para evaluar el efecto insecticida de los extractos comerciales sobre los adultos de las tres especies. Se evaluó la mortalidad a las 24, 48 y 72 horas y se consideró como criterio de muerte aquellos individuos que no respondieron al estímulo de calor, al colocarlos sobre una plancha, con la finalidad de corroborar que no existiera movimiento en los adultos.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con seis tratamientos (extractos vegetales comerciales) y un testigo, con tres repeticiones cada uno, colocándose 30 insectos por unidad experimental. Los valores de mortalidad se corrigieron mediante la fórmula de Abbott (1925). Con estos datos, se estimó la concentración letal media (CL_{50}) mediante un análisis Probit (Finney, 1971), con el programa estadístico SAS System for Windows 9.0.

Discusión y Análisis de Resultados

Las CL_{50} estimadas para los extractos evaluados en *T. castaneum*, se muestran en la Tabla 1. Donde se puede observar, que la mayoría de los extractos solos, presentaron los mejores valores de CL_{50} , excepto para el extracto Higuier Nano®, quien presentó el valor más bajo de CL_{50} con 98.25 partes por millón (ppm). Seguido de Higuier ® y Haarp ® con valores de 196.35 y 288.85 ppm respectivamente. Por último, Etos Nano ® presentó una CL_{50} de 291.92 ppm. En esta especie, la adición de nanopartículas en los extractos no presentó en todos los casos una disminución de la CL_{50} . En el extracto con nanos que alcanzó un menor valor de CL_{50} (Higuier Nano®), se atribuye a la acción de nanopartículas, debido a que son fisiosorbidas por los lípidos cuticulares del insecto, causando daño y desecación (Athanassiou, Kavallieratos, Benelli, Lolic & Desneux, 2018). Este modo de acción es comparable al de la tierra de diatomeas, empleada como vehículo de ingredientes activos para el control de insectos plaga (Kavallieratos, Athanassiou, Peteinatos, Boukouvala & Benelli, 2018). El-Naggar et al., (2020), demostraron la efectividad de nanopartículas solas de dióxido de silicio en el control de *T. castaneum*,

logrando 100 % de mortalidad a las 24 h. Yang, Li, Zhu & Li (2009), registraron mortalidad del 80 % en *T. castaneum* al tratarlos con nanopartículas cargadas con aceite esencial de ajo, mientras que el aceite esencial sólo, causó el 11 %.

Así mismo, Babamir-Satehi, Ziaee & Ashrafi (2017) demostraron la efectividad de nanopartículas de silicio como efectivos acarreadores de ingrediente activo en el control de *T. castaneum*, destacando que las nanopartículas mejoraron la estabilidad y la liberación controlada. Para el caso, de los extractos solos (Azeem® y Haarp®) quienes mostraron valores bajos de CL_{50} (340.30 y 288.85 ppm), en comparación con los extractos con nanopartículas. Podemos mencionar, que en un estudio realizado por Haroun, El-naggar, Zein & Gad (2020) donde se evaluaron nanopartículas de dióxido de silicio solas, en tres especies de insectos de granos almacenados, cuya mortalidad registrada fue de 98.3, 98 y 57 %, respectivamente sobre *Sitophilus oryzae*, *Callosobruchus maculatus* y *T. castaneum*, indicando que *T. castaneum* mostró elevada resistencia, presumiblemente debido a la consistencia cuticular del insecto. Bartlett (1951) citado por Doumbia et al., (2014), evidenció que aquellos insectos con una cutícula más gruesa, como es el caso de *T. castaneum*, reducen las posibilidades de ser dañadas por partículas abrasivas o acarreadoras como nanopartículas de silicio. La consistencia de la cutícula y efectos sinérgicos, podrían explicar los valores de CL_{50} obtenidos.

Para la especie *R. dominica*, como se puede observar (Tabla 2), los extractos sin nanopartículas presentaron valores de CL_{50} mas bajos, en comparación con los extractos con nanopartículas. Siendo el

Tabla 1. Determinación de la concentración letal media CL_{50} , límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para *Tribolium Castaneum*.

Especie de insecto	Extracto	N	CL_{50} ppm	Límites fiduciales Inferior-Superior	Ecuación de predicción
<i>T. castaneum</i>	Azeem ®	30	340.30	298.59 - 381.07	$Y = -9.1021 \pm 3.5950$
	Azeem Nano ®	30	719.89	664.08 - 776.65	$Y = -14.3966 \pm 5.0385$
	Higuier ®	30	196.35	37.88 - 504.62	$Y = -3.9140 \pm 1.7068$
	Higuier Nano®	30	98.25	45.28 - 196.73	$Y = -5.6527 \pm 2.4384$
	Haarp ®	30	288.85	276.98 - 302.14	$Y = -29.7759 \pm 12.1006$
	Haarp Nano®	30	306.75	263.98 - 348.24	$Y = -9.1895 \pm 3.6953$
	Etos ®	30	519.66	441.39 - 608.87	$Y = -5.9408 \pm 2.2419$
	Etos Nano®	30	291.92	243.29 - 344.78	$Y = -6.1078 \pm 2.4775$

N= tamaño de la población.

Fuente: Elaboración propia.

extracto Azeem® quien presentó el valor más bajo con 153.22, seguido de Etos® con 153.31 e Higer con 190.05 ppm respectivamente. El mejor resultado de los extractos con nanopartículas fue el Azeem nano® con un valor de 211.83 ppm.

Los resultados anteriores, pueden ser debido a factores como la baja movilidad del insecto, lo que resulta en un reducido contacto entre la cutícula y las partículas aplicadas, así como la naturaleza de la constitución lipídica de la cutícula de este insecto (Nwuabani, Opit, Otiodun & Adesida, 2014). Dichas características podrían explicar los datos de esta investigación. Ya que los lípidos cuticulares de los insectos, forman mezclas de compuestos que varían considerablemente entre los diferentes taxones (Holze, Schrader & Buellesbach, 2021; Sprenger & Menzel, 2020). Por lo tanto, la interacción extracto-nanopartículas con la cutícula del insecto puede variar y en este caso resultado negativa al proceso de fisiosorción.

Finalmente *S. zeamais* fue el insecto que presentó los valores mas bajos de CL₅₀ para los extractos

con nanopartículas en comparación con los extractos solos (Tabla 3), siendo Etos Nano® e Higer Nano® y Harp nano® con valores de CL50 de 41.16, 57.48 y 80.75 ppm, respectivamente.

La mayor sensibilidad de *S. zeamais* a los extractos con nanopartículas, podría deberse a la estructura cuticular más áspera que les permite retener mayor cantidad de nanopartículas que la de *T. castaneum* (Doubmbia et al., 2014) y a la agregación entre los lípidos cuticulares, que influyen en el proceso de la fisiosorción como las olefinas (Baker, Woo, Nelson & Fatland, 1983), mientras que, para *R. dominica* y *T. castaneum* el proceso de fisiosorción podría ser más complejo, pues los lípidos cuticulares se encuentran fuertemente agregados (por fuerzas de Van der Waals), siendo alcanos y alcanos monometil ramificados, los que afectan el proceso de fisiosorción (Cvacka, Jiroš, Šobotník, Hanus & Svatos, 2006; Brooks, Brunelli, Pattison, Jones & Fitch, 2015; Menzel, Blaimmer & Schmitt, 2017).

Tabla 2. Determinación de la concentración letal media CL₅₀, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para *Rhyzopertha Dominica*.

Especie de insecto	Extracto	N	CL ₅₀ ppm	Límites fiduciales Inferior-Superior	Ecuación de predicción
<i>R. dominica</i>	Azeem ®	30	153.22	41.35 - 895765	Y= -3.3172±1.5179
	Azeem Nano®	30	211.83	0.3419 - 2639	Y=-3.3026 ±1.4198
	Higer®	30	190.05	157.50 - 225.52	Y=-12.0853 ±5.3032
	Higer Nano®	30	282.98	180.19 - 612.71	Y= -8.0332±3.2765
	Haarp ®	30	249.18	140.12 - 1616	Y=-4.3065 ±1.7970
	Haarp Nano®	30	401.13	310.75 - 662.28	Y=-10.0325 ±3.8538
	Etos®	30	153.31	0.9727 - 7300	Y=-2.4092 ±1.1023
	Etos Nano®	30	397.29	137.96 - 684.48	Y= -8.9962±3.4612

N= tamaño de la población.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Determinación de la concentración letal media CL₅₀, límites fiduciales al 95 % de confianza y ecuación de predicción para *Sitophilus zeamais*.

Especie de insecto	Extracto	N	CL ₅₀ ppm	Límites fiduciales Inferior-Superior	Ecuación de predicción
<i>S. zeamais</i>	Azeem ®	30	225.68	208.21 - 242.13	Y= -13.0262±5.5305
	Azeem Nano®	30	180.45	125.51 - 236.28	Y=-9.6174±4.2623
	Higer®	30	91.40	74.59 - 106.19	Y=-6.222±3.1731
	Higer Nano®	30	57.48	32.96 - 84.62	Y=-3.9956±2.2708
	Haarp ®	30	187.60	132.12 - 245.93	Y=-10.2442±4.5064
	Haarp Nano®	30	80.75	2.39 - 176.10	Y=-4.1859±2.1948
	Etos ®	30	122.63	21.01 - 233.97	Y=-4.0519±1.9400
	Etos Nano®	30	41.16	8.95 - 101.61	Y=-2.2897±1.4181

N= tamaño de la población.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los extractos evaluados, en sus versiones solas y con nanopartículas representan una opción viable para el manejo de las tres especies de insectos al estar por debajo de las 1000 ppm. Se observó diferencia en la respuesta al comparar los extractos solos y con nanopartículas, considerando que esta respuesta está influenciada por la etología morfológica de cada especie, así como, las características cuticulares (Componentes lipídicos) que repercuten en la interacción de las nanopartículas con el proceso de fisiosorción.

Referencias

- Abbott, W.S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18: 265-267.
- Alnajim, I., Du, X., Lee, B., Agarwal, M., Liu, T. & Ren, Y. (2019). New method of analysis of lipids in *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Rhyzopertha dominica* (Fabricius) insects by direct immersion solid-phase microextraction (DI-SPME) coupled with GC-MS. *Insects*, 10(10), 363.
- Asrar, M., Ashraf, N., Hussain, S.M., Zia, K. & Rasool, B. (2016). Toxicity and repellence of plant oils against *Tribolium castaneum* (Herbst), *Rhyzopertha dominica* (F.) and *Trogoderma granarium* (e). *Pakistan Entomologist*, 38(1), 55-63. Recuperado de <http://www.pakentomol.com/cms/pages/tables/upload/file/59899ba297d4638-1-10.pdf>
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Benelli, G., Losic, D., Usha Rani, P. & Desneux, N. (2018). Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *Journal of Pest Science*, 91(1), 1-15.
- Attia, M.A., Wahba, T.F., Shaarawy, N., Moustafa, F.I., Guedes, R.N.C. & Dewar, Y. (2020). Stored grain pest prevalence and insecticide resistance in Egyptian populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) and the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.). *Journal of Stored Products Research*, 87, 101611.
- Babamir-Satehi, A., Ziaee, M., & Ashrafi, A. (2017). Synthesis and toxicological evaluation of silica nanoparticles as Chlorpyrifos carrier against the beetle pests *Rhyzopertha dominica* and *Tribolium castaneum*. *Journal of Entomological Society of Iran*, 37(2), 235-247. Recuperado de https://jesi.areeo.ac.ir/article_113231_dc8d38206f93ff6014c53dcc27443a9d.pdf
- Baker, J.E., Woo, S.M., Nelson, D.R. & Fatland, C.L. (1984). Olefins as major components of epicuticular lipids of three *Sitophilus* weevils. *Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Comparative Biochemistry*, 77(4), 877-884.
- Barlett, B.R. (1951). The action of certain inert dust materials on parasitic Hymenoptera. *Journal of Economic Entomology*, 44(6), 891-896.
- Brooks, L., Brunelli, M., Pattison, P., Jones, G & Fitch, A. (2015). Crystal structures of eight mono-methyl alkanes (C26-C32) via single-crystal and powder diffraction and DFT-D optimization. *IUCrJ*, 2(5), 490-497.
- Chen, Z., Schlipalius, D., Opit, G., Subramanyam, B. & Philips, T.W. (2015). Diagnostic molecular markers for phosphine resistance in U.S. populations of *Tribolium castaneum* and *Rhyzopertha dominica*. *PLoS One*, 10(3).
- Cvačka, J., Jiroš, P., Šobotník, J., Hanus, R. & Svatoš, A. (2006). Analysis of insect cuticular hydrocarbons using matrix-assisted laser desorption / ionization mass spectrometry. *Journal of chemical ecology*, 32(2), 409-434.
- De Andrade Melo Junior, J.L., da Silva, J.A., Santoro, K.R. & Badji, C.A. (2018). Insecticide resistance of corn weevil populations from semi-arid regions. *Australian Journal of Crop Science*, 12(3), 430-434.
- Deshwal, R., Vaibhav, V., Kumar, N., Kumar, A. & Singh, R. (2020). Stored grain pests and their management: An overview. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8(5):969-974. Recuperado de <https://www.entomoljournal.com/archives/2020/vol8issue5/PartN/8-4-514-916.pdf>
- Doumbia, M., Douan, B.G., Kwadjo, K.E., Kra, D.K., Martel, V. & Dag-nogo, M. (2014). Effectiveness of diatomaceous earth for control of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae), *Tribolium castaneum* and *Palorus subdepressus* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research*, 57, 1-5.
- Edde, P.A.A. (2012). Review of the biology and control of *Rhyzopertha dominica* (F.) the lesser grain borer. *Journal of Stored Products Research*, 48, 1-18.
- El-Naggar, M.E., Abdesalam, N.R., Fouda, M.M.G., Mackled, M.I., Al-Jaddadi, M.A.M, Ali, H.M, Siddiqui, M.H. & Kandil, E.E. (2020). Soil application of nano silica on maize yield and its insecticidal activity against some stored insects after the post-harvest. *Nano-materials*, 10:719.
- FAO. (1974). Métodos provisionales para la detección y medición de la resistencia de plagas agrícolas a los plaguicidas. Boletín Fito-sanitario de la FAO. 101-107. Roma, Italia.
- Ferverur, J.F., Cortot, J., Rihani, K., Cobb, M. & Everaerts, C. (2018). Desiccation resistance: effect of cuticular hydrocarbons and water content in *Drosophila melanogaster* adults. *PeerJ*, 6: e4318.
- Finney, D.J. (1971). Probit Analysis. 3rd edition. Cambridge University Press. Grant Britain.
- Golden, G., Quinn, E., Shaaya, E., Kostyukovsky, M. & Poverenov, E. (2018). Coarse and nano emulsions for effective delivery of the natural pest control agent pulegone for stored grain protection. *Pest Management Science*, 74(4), 820-827.
- Haroun, S.A., Elnaggar, M.E., Zein, D.M. & Gad, R.I. (2020). Insecticidal efficiency of zinc oxide and hydrophilic silica nanoparticles against some stored seed insects. *Journal of Plant Protection Research*, 60(1), 77-85.
- Hayat, K., Afzal, M., Aqueel, M.A., Ali, S., Khan, Q. M. & Ashfaq, U. (2018). Determination of insecticide residues and their adverse effects on blood profile of occupationally exposed individuals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 163, 382-390.
- Holze, H., Schrader, L. & Buellesbach, J. (2021). Advances in deciphering the genetic basis of insect cuticular hydrocarbon biosynthesis and variation. *Heredity*, 126(2), 219-234.

- Huang, L., Yang, S., Chen, J., Tian, J., Huang, Q. Huang, H., ... & Wei, Y. (2019). A facile Surface modification strategy for fabrication of fluorescent silica nanoparticles with the aggregation-induced emission dye through Surface-initiated cationic ring opening polymerization. *Materials Science Engineering, C* (94), 270-278.
- Jasrotia, P., Nagpal, M., Mishra, C.N., Sharma, A.K., Kumar, S., Kamble, U. & Singh, G.P. (2022). Nanomaterials for post-harvest management of insect pests: current state and future perspectives. *Frontiers in Nanotechnology*, 3, 811056.
- Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Peteinatos, G.G., Boukouvala, M.C. & Benelli, G. (2018). Insecticidal effect and impact of fitness of three diatomaceous earths on different maize hybrids for the eco-friendly control of the invasive stored-product pest *Prostephanus truncatus* (Horn.). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 10407-10417.
- Kumar, D. & Kalita, P. (2017). Reducing postharvest losses during storage of grain crops to strengthen food security in developing countries. *Foods*, 61(8),8.
- Maggioni, K., Silva, L.B., Xavier, Z.F., Munhae, C.B. & Dourados, L.R.B. (2016). Performance of populations of *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae) on different varieties of maize. *African Journal of Agricultural Research*, 11(10), 873-881.
- Mahroof, R.M. & Hagstrum, D., W. (2012). Biology, behaviour, and ecology of insects in processed commodities. En: *Stored Product Protection*. D.W. Hagstrum, T.W. Phillips & G. Cuperus (Ed.), (pp 33-44.). Kansas. Kansas Research and extension
- Menzel, F., Blaimer, B.B. & Schmitt, T. (2017). How do cuticular hydrocarbons evolve? Physiological constraints and climatic and biotic selection pressures act on a complex functional trait. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284 (1850),20161727.
- Nwosu, L.C. (2018). Impact of age on the biological activities of *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) adults on stored maize: implications for Food security and pest management. *Journal of Economic Entomology*, 111(5), 2454-2460.
- Nwuabani, S.I., Opit, G.P., Otiodun, G.O. & Adesida, M.A. (2014). Efficacy of two Nigeria-derived diatomaceous earths against *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae) and *Rhyzopertha dominica* (Coleoptera: Bostrichidae) on wheat. *Journal of Stored Products Research*, 59, 9-16.
- Patiño-bayona, W.R., Nagles Galeano, L.J., Bustos cortes, J.J., Delgado Ávila, W. A., Herrera Daza, E., SUÁREZ, L.E.C., Prieto-Rodriguez, J.A. & Patiño-Ladino, O.J. (2021). Effects of essential oils from 24 plant species on *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera, Curculionidae). *Insects*, 12(532).
- Pires, E.M. & Nogueira, R.M. (2018). Damage caused by *Rhyzopertha dominica* (Fabricius,1792) (Coleoptera: Bostrichidae) in stored Brazil nuts. *Scientific Electronic Archives*, 11(1), 57-61.
- Quellhorst, H., Athanassiou, C.G., Bruce, A., Scully, E.D. & Morrison III, W.R. (2020). Temperature-mediated competition between the invasive larger grain borer (Coleoptera: Bostrichidae) and the cosmopolitan maize weevil (Coleoptera: Curculionidae). *Environmental Entomology*, 49(1). 255-264.
- Rastogi, A., Tripathi, D.K., Yadav, S., Chauhan, D.K., Živčák, M., Ghorbanpour, M., & Brestic, M. (2019). Application of silicon nanoparticles in agriculture. *3 Biotech*, 9(3), 1-11.
- SAS Software. SAS System for Windows. 9.0.
- Scheff, D.S., Campbell, J.f. & Arthur, F.H. (2022). Seasonal, landscape and attractant Effects on lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.), captures in Northeast Kansas. *Agronomy*, 12 (99).
- Shukla, P., Chaurasia, P., Younis, K., Qadri, O.S., Faridi, S.A. & Srivastava, G. (2019). Nanotechnology in sustainable agriculture: studies from seed priming to post-harvest management. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 4(1), 1-15.
- Sleem, F.M.A. (2021). Insecticidal effect of *Piper nigrum* L. (Piperaceae) and *Prunus cerasus* L. (Rosaceae) seeds extract against *Rhyzopertha dominica* F. (Coleoptera: Bostrichidae). *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 9(3), 2319-1473. Recuperado de https://www.ijair.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJAIR_3286_FINAL.pdf
- Sparks, T.C., Storer, N., Porter, A., Slater, R., y Nauen, R. (2021). Insecticide resistance management and industry: the origins and evolution of the Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) and the mode of action classification scheme. *Pest Management Science*, 77(6), 2609-2619.
- Sprenger, P.P. & Menzel, F. (2020). Cuticular hydrocarbons in ants (Hymenoptera: Formicidae) and other insects: how and why they differ among individuals, colonies, and species. *Myrmecological News*. 30: 1-26.
- Upadhyay, N., Dwivedy, A.K., Kumar, M., Prakash, B. & Dubey, N.K. (2018). Essential oils as eco-friendly alternatives to synthetic pesticides for the control of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Essential Oil Bearing Plants*, 21(2), 282-297.
- Yang, F.L., Li, X.G., Zhu, F. & Li, C.L. (2009). Structural characterization of nanoparticles loaded with garlic essential oil and their insecticidal activity against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(21), 10156-10162.