

Mecanismos de resistencia de poblaciones de maíz originarias de México al ataque del picudo *Sitophilus zeamais*

Henry López-López^{1,2}, Joel de Santiago-Meza^{1,2}, Eduardo Hernandez-Alonso³, Juan Carlos Delgado-Ortiz^{2,4}, Epifanio Castro-del Ángel² y Agustín Hernández-Juárez^{2,*}

- ¹ Estudiante de posgrado. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923. 25315, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
- ² Departamento de Parasitología, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923. 25315, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
- ³ Instituto Mexicano del Maíz, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Calzada Antonio Narro 1923. 25315, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
- ⁴ Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Av. Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, Alcaldía Benito Juárez. 03940, Ciudad de México, México

Resumen

Sitophilus zeamais (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae) es una plaga responsable de enormes pérdidas de granos de maíz en postcosecha, estimadas en un 60 % durante los primeros seis meses de almacenamiento. El objetivo de la presente investigación fue evaluar la resistencia de cinco poblaciones de maíz nativo de México, frente al daño causado por *S. zeamais*. Se apreció que las poblaciones de los colores 'VAN-Azul' y 'VAN-Variegado' son duras, en comparación con el híbrido blanco 'AN-456' y 'VAN-Roja' que fueron medianamente duras. En la libre elección (antixenosis), 'VAN-Azul' y 'VAN-Morada' ejercen repelencia sobre adultos de *S. zeamais*. La población 'VAN-Azul' perdió menos peso ante el ataque de *S. zeamais*; sin embargo, 'VAN-Roja' y el híbrido blanco 'AN-456' fueron muy susceptibles. El efecto de antibiosis se manifestó a los 45 días posteriores a la infestación (dpi) en el híbrido blanco y 'VAN-Azul', con la tasa de daño más baja (38 %). La mortalidad de adultos fue del 100 % en 'VAN-Morada' a los 60 dpi. Se encontró correlación positiva entre los parámetros de antixenosis y pérdida de peso. Las poblaciones 'VAN-Morado' y 'VAN-Azul' presentaron las mejores características de resistencia ante el daño de *S. zeamais*, lo cual sugiere que son potencialmente útiles como opción de mejoramiento para el desarrollo de variedades mejoradas con características de resistencia ante el ataque *S. zeamais*.

Palabras clave: Antibiosis, antixenosis, mortalidad, razas de maíz, tolerancia.

* Autor para correspondencia: chinoahj14@hotmail.com

Resistance of mechanisms of maize populations native to México against the weevil *Sitophilus zeamais*

Abstract

Sitophilus zeamais (Motschulsky) (Coleoptera: Curculionidae) is a pest responsible for enormous post-harvest grain losses of maize, estimated at 60 % during the first six months of storage. This study evaluated the resistance of five native maize populations in Mexico to damage caused by *S. zeamais*. It was appreciated that the populations of the color 'VAN-Blue' and 'VAN-Variegado' were hard, while the white hybrid 'AN-456' and 'VAN-Red' were moderately hard. In free choice (antixenosis), 'VAN-Blue' and 'VAN-Purple' exerted repellency on adults of *S. zeamais*. The 'VAN-Blue' population lost less weight to the attack of *S. zeamais*; however, 'VAN-Red' and the white hybrid 'AN-456' were highly susceptible. The antibiosis effect was manifested after 45 days post-infestation (dpi) in the white hybrid and 'VAN-Blue' with the lowest damage rate (38 %). Adult mortality ranged from 100 % in 'VAN-Purple' at 60 dpi. A positive correlation existed between antixenosis parameters and weight loss. The 'VAN-Purple' and 'VAN-Blue' populations showed the best resistance characteristics against *S. zeamais* damage, suggesting that they are potentially useful as a breeding option for developing improved varieties with resistance characteristics against *S. zeamais* attack.

Keywords: Antibiosis, antixenosis, maize breeds, mortality, tolerance.

Introducción

Desde la antigüedad en Mesoamérica se ha cultivado el maíz *Zea mays* L. (Poaceae) (Mejía et al., 2022). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), señaló que en 2019/2020 México fue el quinto mayor consumidor de maíz a nivel mundial con 44,5 millones de toneladas (Žilić et al., 2022), ocupando el séptimo lugar en cuanto a producción con 27.424.527,55 toneladas en 2020 (SIAP, 2022). El maíz exhibe una gran biodiversidad, ocupando el tercer lugar en importancia después del trigo *Triticum aestivum* L. y el arroz *Oryza sativa* L. (Poaceae), y se emplea como alimento, forraje y materia prima para la industria (Rathna Priya y Manickavasagan, 2021). Su producción se mantiene todo el año, lo que genera condiciones favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades, cuya prevalencia es un riesgo potencial para el manejo del cultivo (Hernández-Cruz et al., 2019).

El picudo del maíz *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) es un insecto del orden Coleoptera: Curculionidae, y se considera una de las principales plagas pre y postcosecha, cuyo daño

se detecta principalmente durante el almacenamiento (García-Lara y Bergvinson 2013; Mamoon-Ur-rashid et al., 2021) como un colonizador primario del grano de maíz (Trematerra et al., 2014), donde produce hasta un 60 % de pérdidas de peso y calidad dentro de los 3 a 6 primeros meses de almacenamiento en los países en desarrollo (Ileke et al., 2020). Su distribución es mundial, afecta principalmente a regiones tropicales, subtropicales húmedas y templadas (Hong et al., 2018). Los adultos perforan el grano para ovipositar, mientras que las larvas forman surcos en el endospermo al alimentarse, su ciclo de vida es de 30 a 113 días, y su presencia favorece el ataque de otros organismos (García-Lara et al., 2019).

Para disminuir el ataque de estos insectos, reducir las pérdidas postcosecha y mantener la calidad del grano se han generado diversas alternativas, destacando la búsqueda de resistencia genética de materiales vegetales (García-Lara y Bergvinson, 2013). La resistencia de las variedades de maíz al gorgojo *S. zeamais* se relaciona con el pericarpio o la no preferencia y con el endospermo o antibiosis. El principal componente del grano de maíz

que contribuye a su dureza es el endospermo (Figuroa-Cárdenas *et al.*, 2013). La dureza y la textura cristalina del grano es una propiedad fisiológica que ayuda a que exista un menor daño ocasionado por las plagas de almacén (Velásquez-Salazar y Diamont, 2014).

De las 220 poblaciones nativas de maíz identificadas en América Latina, 64 se han registrado en México; con características particulares en el tipo de endospermo y dureza del grano, contribuyendo a la calidad del grano en comparación con los híbridos comerciales (Palacios-Pola *et al.*, 2021; Velásquez-Salazar *et al.*, 2021). La existencia de pigmentos en el maíz se debe a los metabolitos secundarios que contienen, como flavonoides, carotenoides y fenoles; que se concentran en la capa de aleurona de los granos y el pericarpio grueso (Colombo *et al.*, 2021). Los maíces de colores originarios de México (amarillo, rojo, rosa, naranja, azul y morado) muestran propiedades antioxidantes, antiinflamatorias, anticancerígenas y nutricionales; el maíz azul o morado particularmente son buenas fuentes de compuestos como los polifenoles y antocianinas (Velásquez-Salazar *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2022). El objetivo de la pre-

sente investigación fue evaluar los mecanismos de resistencia del grano de poblaciones de maíz de colores contra el daño causado por el picudo del maíz *S. zeamais* bajo condiciones de laboratorio.

Material y métodos

Material vegetal

Los granos de cuatro poblaciones ('VAN-Morado', 'VAN-Azul', 'VAN-Rojo' y 'VAN-Variegado') y un híbrido ('AN-456 Blanco') de maíz con diferentes pigmentaciones provienen de accesiones proporcionadas por el Dr. Humberto De León Castillo (Hernández-Alonso y De León-Castillo, 2021) del programa de mejoramiento del Instituto Mexicano del Maíz de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. La pigmentación fue rojo, variegado, morado y azul, cuyas poblaciones se encuentran en proceso de mejoramiento a través de selección recurrente, y un híbrido blanco denominado 'AN-456' que se encuentra en proceso de comercialización (Tabla 1). El estudio se llevó a cabo en el área de cáma-

Tabla 1. Descripción de las poblaciones e híbrido de maíces de color utilizados en el estudio.
Table 1. Description of the populations and hybrids of colored maize used in this study.

Poblaciones	Descripción
VAN-Morado y VAN-Azul	Presentan un tipo de grano que va desde semicristalino a semidentado, se caracteriza por su alto contenido en antocianinas, las cuales brindan el color intenso al grano.
VAN-Rojo	Se caracteriza por un color rojo intenso en la aleurona del grano, muestra un tipo de grano que va desde semidentado ha dentado, además presenta un alto contenido de azúcares.
VAN-Variegado	Se determina por ser un grano de color rojo que muestra franjas de color blanco y amarillo en posición longitudinal, generadas por una alta frecuencia de transposones, presentando variantes en tipo de grano semicristalinas a semidentadas.
AN-456 Blanco	Muestra un tipo de grano semicristalino ha semidentado.

ras bioclimáticas y laboratorios del Departamento de Parasitología de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN) en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, a una temperatura de 25 ± 2 °C, fotoperíodo de 14/10 h L:O (luz: oscuridad) y humedad relativa (HR) 65 ± 5 %.

Colonia de insectos

Adultos del picudo del maíz *S. zeamais* se colectaron de mazorcas de un híbrido comercial de maíz amarillo, maíz que fue tamizado para separar granos, polvo e insectos. Posteriormente, los adultos obtenidos se colocaron en un recipiente de vidrio protegido con tela de tipo organza de 40 mm para permitir la ventilación, alimentados con semilla de maíz, a 25 ± 2 °C, 65 ± 5 % HR y bajo condición de 14/10 h L:O, hasta el inicio del ensayo (Tefera et al., 2011). La corroboración de la especie se

llevó a cabo con las características mencionadas por Hong et al. (2018); usando claves pictóricas de las longitudes del funículo antenal I y II, la elevación lateral del escutelo, el lóbulo medio del edeago genital masculino, el lóbulo lateral del esclerito en forma 'Y' de los genitales externos femeninos, así como la varilla epifaríngea y los órganos sensoriales apicales en el palpo labial en las larvas.

Dureza de granos de maíz

Se tomaron 100 granos de maíz y se registró el peso de cada población y del híbrido blanco de maíz en una balanza analítica 125-1s (Sartorius). Posteriormente, se determinó la dureza del grano mediante la norma mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002 con un índice de flotación con nitrato de sodio; de acuerdo con el número de granos flotantes y con base en la clasificación de la Tabla 2.

Tabla 2. Escala de dureza de granos de maíz mediante el índice de flotación de acuerdo con la norma mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002.

Table 2. Corn kernel hardness scale using the flotation index according to Mexican standard NMX-FF-034/1-SCFI-2002.

Granos flotantes	Dureza	Genotipos
0-12	Muy duro	VAN-Morado
13-37	Duro	VAN-Azul y VAN-Variegado
38-62	Intermedio	VAN-Rojo y AN-456 Blanco
63-87	Suave	
88-100	Muy suave	

Determinación de humedad en las poblaciones de maíz

De acuerdo con la metodología descrita por la norma mexicana NMX-FF-034/1-SCFI-2002,

se calculó la humedad por medio de una diferencia de peso y se expresó en porcentaje:

$$\text{Humedad \%} = \frac{\text{peso original de la semilla} - \text{peso seco de semilla en estufa}}{\text{peso original de la semilla}} \times 100$$

La humedad de todas las poblaciones y del híbrido blanco de maíz se ajustó a 12 % mediante secado en estufa DX 602C (Yamato) a 105 °C durante 24 h.

Prueba de libre elección (antixenosis)

Bajo condiciones controladas de laboratorio a 25 ± 2 °C y una humedad relativa de 65 ± 5 %, esta prueba se basó en lo descrito por Trematerra et al. (2014) con modificaciones. Se llevó a cabo en una caja cilíndrica de plexiglás de 40 cm de alto por 80 cm de diámetro, y recubierta en la parte superior con tela de tipo organza de 40 mm para permitir la ventilación. Se adaptaron cinco cajas a un diseño o arreglo en forma de 'X'. La caja central está conectada con las demás cajas mediante tubos de plástico colocados en diagonal y uno frente al otro. En las cajas de los extremos se colocaron 10 g de las diferentes poblaciones de maíz y en la caja central (sin maíz) se liberaron 20 adultos de *S. zeamais* sin sexar.

La evaluación se realizó a las 24 h, contabilizando el número de insectos atraídos en cada población. Durante el experimento, las poblaciones y el híbrido blanco de maíz se colocaron al azar y se ejecutaron cinco repeticiones. Con los datos se estableció el índice de repelencia mediante la fórmula propuesta por Rodríguez-Ledesma et al. (2017):

$$IR = \frac{2G}{(G+P)}$$

Donde:

IR = índice de repelencia; G = porcentaje de insectos en el tratamiento; P = porcentaje de insectos en el control. Se utilizó como referencia para esta prueba: (IR = 1) neutro; (IR > 1) atrayente y (IR < 1) repelente.

Ensayo de tolerancia de poblaciones de maíz al ataque de *S. zeamais*

Conforme lo establecido por Khakata et al. (2018) con modificaciones, se tomaron 50 semillas de cada población e híbrido blanco de maíz, se colocaron en frascos de 500 mL y posteriormente se colocaron 5 adultos de *S. zeamais* sin sexar de 7 días de edad. Se incluyó un testigo donde no se incorporaron insectos y finalmente los frascos se cubrieron con una malla de tela fina de 40 mm para evitar que los insectos se escapen y asegurar una ventilación adecuada. Se mantuvieron en condiciones de laboratorio a 25 ± 2 °C, 65 ± 5 % HR y fotoperíodo de 14/10 h L:O. Las evaluaciones de pérdida de peso y daño al grano se realizaron a los 15, 30 y 45 días posteriores a la infestación (dpi).

Resistencia (tolerancia) de poblaciones de maíz al ataque de *S. zeamais* a través de la pérdida de peso

Este parámetro se estableció en base al trabajo descrito por Tefera et al. (2011). Se calculó la pérdida de peso en % de los granos por medio del procedimiento de recuento y peso con la siguiente ecuación:

$$\text{Pérdida de peso (\%)} = \frac{(Wd \times Nu) - (Wu \times Nd)}{Wu \times (Nd + Nu)} \times 100$$

Donde:

Wd = peso de semilla dañada por el insecto;
Nu = número de semillas no dañadas.

Wu = peso de la semilla sin daño de insecto;
Nd = número de semillas dañadas por el insecto.

Posteriormente las poblaciones y el híbrido blanco se clasificaron según la categoría de resistencia basada en la pérdida de peso del grano (Tabla 3) (Khakata et al., 2018).

Tabla 3. Nivel de resistencia de los granos de maíz al ataque de *Sitophilus zeamais* basada en la pérdida de peso propuesta por Tefera et al. (2011).

Table 3. Level of corn grain resistance to *Sitophilus zeamais* attack based on weight loss proposed by Tefera et al. (2011).

Escala	Descripción	Reacción de resistencia
1	Pérdida de peso del grano ≤ 2 %, menor que el control.	Resistente
2	Pérdida de peso del grano 2,1-4 %, menor que el control.	Moderadamente resistente
3	Pérdida de peso del grano 4,1-6 %, menor que el control.	Moderadamente susceptible
4	Pérdida de peso del grano 6,1-8 %, menor que el control.	Susceptible
5	Pérdida de peso del grano superior al 8,1 %, menor que el control.	Muy susceptible

Daño en granos (tolerancia) de poblaciones de maíz ante el ataque de S. zeamais

Se determinó el daño que sufrió el grano de maíz con base en lo establecido por Nwosu et al. (2016). Se contabilizó el número de granos dañados a partir de la relación entre el número de granos picados con respecto al número total de granos muestreados a los 15 dpi, 30 dpi y 45 dpi expresando el resultado en porcentaje.

Mortalidad (antibiosis) de adultos de S. zeamais por las poblaciones de maíz

Se evaluó al finalizar el experimento (60 dpi), contando el número de adultos muertos que no respondieron a las punciones con un alfiler y se expresó en porcentaje.

Análisis de datos

Se realizó un diseño completamente al azar, con cinco tratamientos y tres repeticiones para la dureza de grano, antixenosis, tolerancia al ataque y mortalidad de adultos. La normalidad y homogeneidad de las varianzas se probaron mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Tukey ($p \leq 0,05$) usando el software estadístico Statistical Analysis System versión 9.0 (SAS 2002). Finalmente, se efectuó un análisis de correlación de Pearson para conocer la relación entre las variables.

rov-Smirnov. Los datos fueron analizados mediante análisis de varianza y prueba de rango múltiple de Tukey ($p \leq 0,05$) usando el software estadístico Statistical Analysis System versión 9.0 (SAS 2002). Finalmente, se efectuó un análisis de correlación de Pearson para conocer la relación entre las variables.

Resultados y discusión

Existe gran diversidad de poblaciones de maíces (Figura 1) cuyo color de grano es un factor sustancial, relacionado con diversas concentraciones de betacarotenos y betacriptoxantina (precursores de vitamina A) que impactan en la calidad y el uso final del grano (Rathna Priya y Manickavasagan, 2021). Así mismo, la densidad o la dureza (que influye en la defensa física ante el ataque de plagas y enfermedades, en el secado y molienda) del grano se relacionan con valores de peso (García-Lara et al., 2019).

En la dureza de las diversas poblaciones mejoradas de maíz (Tabla 2) se aprecia que los granos de colores morado, azul y variegado presentan la característica de alta dureza y los granos del híbrido blanco y la población roja

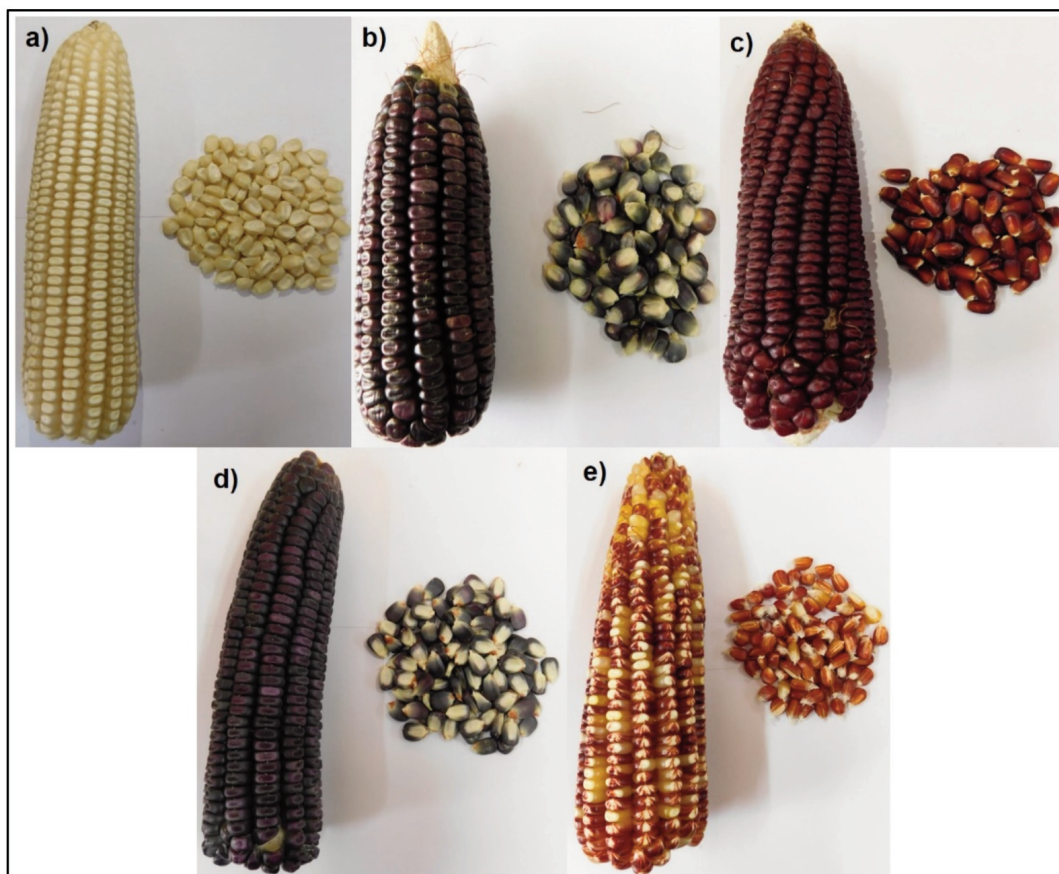


Figura 1. Genotipos de maíz pigmentado utilizado, a) híbrido 'AN-456'; b) 'VAN-Morado'; c) 'VAN-Rojo'; d) 'VAN-Azul' y e) 'VAN-Variegado'.

Figure 1. Genotypes of pigmented maize used, a) hybrid 'AN-456'; b) 'VAN-Purple'; c) 'VAN-Red'; d) 'VAN-Blue'; and e) 'VAN-Variegated'.

una dureza intermedia. Los métodos para determinar la dureza del grano de maíz varían según a la disponibilidad o la simplicidad del equipo requerido para el análisis y si involucra tratamiento químico, físico o de procesamiento de imágenes. La densidad del grano por el método físico describe la relación entre el tipo de endospermo (vitreo o harinoso) y su flotabilidad (Arriaga-Pérez et al., 2019).

El índice de flotabilidad se usa como una medida indirecta para evaluar la dureza de los

granos de maíz (cuanto mayores son los granos flotantes, menor será el rendimiento del grano). Las poblaciones de maíz que muestran un alto índice de flotación son susceptibles a plagas y enfermedades en postcosecha; así como bajo rendimiento de granos cocidos para la nixtamalización (Odjo et al., 2022). La dureza está relacionada con gránulos poligonales grandes y pequeños dentro de la matriz proteica (proteína zeína) compacta, que propician una densidad alta, expresando de

manera negativa la flotación del grano (Gaytán-Martínez et al., 2006).

Para una mejor dureza y un alto valor proteico del grano maduro, es necesario que el grano presente un endospermo con un grado de empaquetamiento organizado en los espacios intergranulares perfectamente llenos de los componentes celulares de proteína, almidón y un elevado contenido de zeína α o γ . De igual manera, una mayor concentración de endospermo córneo genera mayor dureza del grano en las diferentes poblaciones de maíz (Rathna Priya y Manickavasagan, 2021).

Sandhu et al. (2007) encontraron en diferentes razas de maíz de la India, una correlación positiva entre la dureza de los granos ($r = 0,950$; $p < 0,01$) y una elevada concentración de amilosa del almidón. En Morelos (México),

a partir 26 poblaciones nativas pigmentadas, se identificaron dos de color azul ('ECxPep14' y 'PepxE008') con bajos índices de flotación, demostrando estos granos una mayor dureza (Broa Rojas et al., 2019). Dichos resultados son consistentes con la dureza registrada en la población 'VAN-Azul' de nuestro ensayo.

En la prueba de elección (antixenosis) de *S. zeamais* sobre granos de diferentes poblaciones y del híbrido blanco de maíz se observó que los granos 'VAN-Variegados' son neutros (igual a 1) ante la preferencia de *S. zeamais*. Sin embargo, los granos del híbrido 'AN-456 Blanco' y la población 'VAN-Roja' fueron atractivos para el insecto (mayor a 1), y las poblaciones de grano 'VAN-Morado' ocasionaron repelencia del insecto (menor a 1) (Figura 2). Diferentes estudios han descrito que

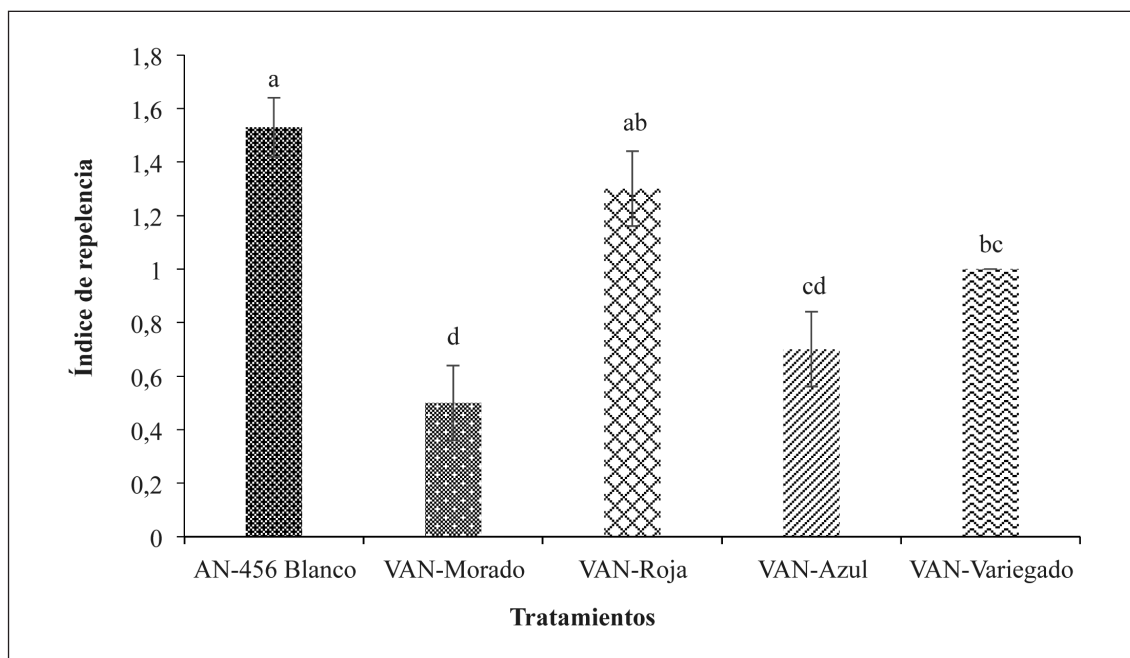


Figura 2. Antixenosis de *Sitophilus zeamais* sobre granos de poblaciones de maíces nativos y el híbrido blanco. Letras iguales no representan diferencia estadística significativa (Tukey $p = 0,05$).

Figure 2. Antixenosis of *Sitophilus zeamais* over grains of native corn populations and the white hybrid. The same letters do not represent a significant statistical difference (Tukey $p = 0.05$).

la cutícula del grano (capa impermeable cerosa) está involucrada en el reconocimiento y repelencia de condiciones abióticas y bióticas. La epicutícula del grano de maíz ha revelado que es la encargada de regular la presencia de alcoholes, esteroides, ácidos grasos, esteroides e hidrocarburos alifáticos que evitan la desecación del grano o el ataque de *S. zeamais* (Usseglio et al., 2018).

En la presente investigación, se pudo observar que los granos de la población de color morado lograron alcanzar hasta 60 % de repelencia, comparada con la población de granos de color rojo (Figura 2). A pesar de que *S. zeamais* es una plaga generalista y con preferencia por el grano de maíz; los compuestos volátiles juegan un papel importante en el ataque al grano junto con la textura, tamaño, edad y dureza externa del grano; que propician más tiempo para ser penetrados y ocasiona que la adaptación del insecto sea más específica con la asignación de más recursos (Stuhl, 2019). La susceptibilidad del

grano también se debe al aumento de almidón y proteínas (Nwosu et al., 2016). Además, Astuti et al. (2019) observaron en diferentes híbridos de maíz la repelencia sobre *S. zeamais* debido al contenido alto de fibra, ácidos fenólicos e inhibición de la tripsina.

En relación con el análisis de la pérdida de peso del grano de maíz se demuestra que la población 'VAN-Azul' fue resistente ante el ataque de *S. zeamais* durante toda la investigación (Tabla 4). Las poblaciones 'VAN-Morado' y 'VAN-Variegado' fueron moderadamente resistentes, mientras que el grano VAN-Variegado fue neutro en la prueba de antixenosis (repelencia o atracción) (Figura 2). Por tanto, estos resultados sugieren que estas poblaciones son potencialmente útiles para resistencia a *S. zeamais*. La población 'VAN-Roja' inicialmente fue moderadamente susceptible, pero incrementó a muy susceptible a los 30 dpi y 45 dpi. Por último, el híbrido blanco 'AN-456' fue muy susceptible durante todo el ensayo. Cabe mencionar que

Tabla 4. Pérdida de peso del grano de maíz ante el ataque de *Sitophilus zeamais* con base en la escala del nivel de resistencia en condiciones controladas de laboratorio a 25 ± 2 °C y una humedad relativa (HR) de 65 ± 5 %.

Table 4. Corn kernel weight loss to *Sitophilus zeamais* attack based on resistance level scale in controlled laboratory conditions at 25 ± 2 °C and relative humidity (RH) of 65 ± 5 %.

Genotipos/Tratamientos	Días posteriores a la infestación		
	15	30	45
AN-456 Blanco	5 ± 0,35 a	5 ± 0,24 a	5 ± 0,20 a
VAN-Morado	1,5 ± 0,70 b	2 ± 1,00 bc	2 ± 0,15 b
VAN-Roja	3,5 ± 2,12 b	4 ± 1,41 ab	5 ± 0,20 a
VAN-Azul	1 ± 0,50 b	1 ± 0,50 c	1 ± 0,50 c
VAN-Variegado	1,5 ± 0,70 b	2 ± 0,50 bc	2 ± 0,20 b
p-valor	0,0494	0,0069	0,0001

Letras iguales en la misma columna no representan diferencia estadística significativa (Tukey $p = 0,05$).

el aumento de proteínas, almidón, sodio, calcio, fósforo, zinc, hierro, magnesio, manganeso y cobalto en el grano de maíz generan mayor susceptibilidad al daño e infestación por gorgojos (Nwosu, 2016). Khakata et al. (2018) demostraron que la línea endogámica 'DUMA 41 (S)' de maíz blanco es muy susceptible ante el ataque de *S. zeamais*, aumentando la pérdida de peso del grano hasta los 120 dpi. Como se ha podido observar en nuestra investigación, el híbrido 'AN-456 Blanco' fue el que mayor pérdida de peso presentó a lo largo del ensayo, posiblemente por lo mencionado previamente, así como por la dureza intermedia y ser un grano semicristalino.

Por otra parte, variedades de maíz palomero de color naranja y amarillo mostraron resistencia ante el ataque de *S. zeamais* a los 90 dpi a 27 °C (Suleiman et al., 2015). Las bases químicas del grano de maíz para los mecanismos de resistencia a *S. zeamais* no solo se basan en la presencia del inhibidor de cisteína proteinasa, es necesaria la presencia de compuestos fenólicos, fibra cruda y el inhibidor de

tripsina y la enzima peroxidasa en el endospermo que no afectan de manera negativa la palatabilidad y nutricional del grano (Nwosu, 2016; López-Castillo et al., 2018).

El daño ocasionado en los granos de las diferentes poblaciones de maíz por *S. zeamais* confirman que el color no es un factor de resistencia para evitar el ataque del insecto, como se observa en la Tabla 5 a los 15 dpi, ya que el porcentaje de grano dañado es bajo y similar en todas las poblaciones. A los 30 dpi los granos dañados por el gorgojo aumentaron en las poblaciones 'VAN-Variegado', 'VAN-Roja' y 'VAN-Morado' con el 52 %, 46 % y 41 %, respectivamente. Al término del estudio (45 dpi) se presentó un alto porcentaje de granos dañados en las poblaciones 'VAN-Roja' y 'VAN-Variegado' (85 % y 83 %, respectivamente). Es importante mencionar que los granos de las poblaciones 'VAN-Morado' y 'VAN-Variegado' a pesar de presentar ataque por el gorgojo, el daño ocasionado en la estructura del grano fue mínimo, no afectó significativamente el peso (Tabla 4) y generó una mortalidad elevada en el insecto (Tabla 6).

Tabla 5. Porcentaje de daño causado por *Sitophilus zeamais* en el grano del híbrido blanco y en las diferentes poblaciones de maíz.

Table 5. Percentage of damage caused by *Sitophilus zeamais* on white hybrid grain and different maize populations.

Genotipos/Tratamientos	Días posteriores a la infestación		
	15	30	45
AN-456 Blanco	11 ± 1,42 b	29 ± 7,07 c	38 ± 16,97 b
VAN-Morado	12 ± 2,82 b	41 ± 1,41 abc	53 ± 4,24 ab
VAN-Roja	22 ± 2,83 a	46 ± 2,83 ab	85 ± 9,89 a
VAN-Azul	9 ± 1,42 b	35 ± 4,24 bc	38 ± 5,66 b
VAN-Variegado	7 ± 1,41 b	52 ± 2,82 a	83 ± 1,42 a
<i>p</i> -valor	0,0052	0,0150	0,0083

Letras iguales en la misma columna no representan diferencia estadística significativa (Tukey $p = 0,05$).

Tabla 6. Mortalidad de *Sitophilus zeamais* en poblaciones nativas de maíces de color y el híbrido blanco a 60 días de infestación.

Table 6. Mortality of *Sitophilus zeamais* in native populations of colored corn and the white hybrid after 60 days of infestation.

Genotipos/Tratamientos	Mortalidad (%)
AN-456 Blanco	50 ± 14,14 b
VAN-Morado	100 ± 0 a
VAN-Rojo	80 ± 0 ab
VAN-Azul	90 ± 14,14 ab
VAN-Variegado	90 ± 14,14 ab
p-valor	0,0359

Letras iguales no representan diferencia estadística significativa (Tukey $p = 0,05$).

Estos resultados sugieren que las poblaciones de maíz de color evaluadas han desarrollado grados de resistencia, probablemente a través de segregantes transgresivos generados a partir de la heredabilidad de los padres, que a pesar de ser atacados por *S. zeamais* limitan su alimentación y el insecto opta por atacar otro grano (Zunjare et al., 2015). Los insectos adultos de *S. zeamais* se ven atraídos por los granos de color, sin embargo, las poblaciones de colores nativas presentan ventajas como: compuestos fenólicos, antocianinas, inhibidores de la proteínasa, bajo índice de flotación, dureza del pericarpio, endospermo y del embrión, forma redonda del grano, bajo contenido de humedad y elevado índice de aminoácidos como el triptófano, que mejoran la repelencia sobre estos insectos generalistas (Broa Rojas et al., 2019; Ugagu et al., 2021).

Los resultados de la presente investigación son congruentes con otros estudios realizados con híbridos de maíz tras la infestación de *S. zeamais* a los 60 días, donde la heredabilidad se demostró que fue de moderada a alta sobre la tolerancia ante el ataque (Khakata et al., 2018),

posiblemente también el grosor del pericarpio juega un papel importante en la interacción insecto-grano que limita la alimentación y la oviposición (López-Castillo et al., 2018). Burgos-Díaz et al. (2020) demostraron que la población nativa morada 'X ej'ub' tenía 14,6 % menos de granos dañados a los 30 dpi por *S. zeamais*, en comparación con las poblaciones blancas 'Nal t'eel' y 'Sac nal'.

Las poblaciones de maíz 'VAN-Morado' y 'VAN-Variegado' ejercieron sobre *S. zeamais* una mortalidad de 90 % a 100 % (Tabla 6), aumentando hasta un 50 % dicha mortalidad en comparación con el híbrido 'AN-456 Blanco' con la menor mortalidad. Diferentes estudios han puesto de manifiesto que los genotipos de maíz que presentan alta concentración de antocianinas (como las razas moradas con 4910 mg/kg de peso seco) (Colombo et al., 2021), compuestos fenólicos y dureza tienden a ser resistentes al ataque de *S. zeamais*, y en algunas ocasiones propician la mortandad por inanición (Rahardjo et al., 2017). También poco polvo en el grano y baja pérdida de peso por el daño del insecto son indicativos positivos del efecto que generan las poblaciones silvestres sobre la mortalidad de *S. zeamais* (Adebowale et al., 2019). Así mismo, algunos factores genéticos de resistencia en el endospermo blando (sen1, sen3 y sen5) son asociados a dicho efecto (López-Castillo et al., 2018). Además, algunos genotipos de maíz promueven una alta mortalidad parental debido a la segregación de las generaciones F₂ que se refleja en la antibiosis, al igual que la presencia de proteínas que impiden la alimentación de *S. zeamais* como la cisteína proteasa de 33 kDa, triptófano, bajo contenido total de azúcares o las propiedades biofísicas (dureza y textura) (Nhamucho et al., 2017).

Los resultados de correlación de Pearson entre los parámetros de antixenosis y pérdida de peso mostraron una relación significativa positiva elevada ($r = 0,8314$; $p < 0,005$).

Una correlación negativa fuerte se pudo observar entre la antixenosis con la mortalidad ($r = -0,838$; $p < 0,005$) y mortalidad con pérdida de peso ($r = -0,860$; $p < 0,005$).

Acheampong et al. (2019) demostraron que la variedad de maíz 'Aseda' inhibió el ataque de *S. zeamais* con menor pérdida de peso, daño y alta germinación del grano; así como una alta mortalidad de adultos y retraso en el desarrollo, minimizando la merma de semillas cuando se almacenan durante tres meses. Los genotipos resistentes reducen la tasa de daño a los granos almacenados causados por escarabajos y palomillas, debido a la dureza del grano, pericarpio liso (impedimento de las mandíbulas para el agarre), así como la

concentración alta de compuestos fenólicos (Mamoon-Ur-rashid et al., 2021). Además mantienen la germinación de los granos y la calidad, muy probablemente por alelos adaptativos como las líneas endogámicas retrocruzadas (BILs) y los locus de rasgos cuantitativos (QTLs) que continúan evolucionando para que los mecanismos de tolerancia y resistencia subsistan (Joshi et al., 2021).

Para el desarrollo de la resistencia del grano sobre plagas de insectos en granos almacenados, se necesita implementar programas de mejoramiento genético a partir de poblaciones nativas de maíz como una alternativa económicamente viable y ecológicamente justificable (López-Castillo et al., 2018).

Tabla 7. Correlación de Pearson entre los parámetros evaluados de las poblaciones de maíz ante el ataque de *Sitophilus zeamais*.

Table 7. The Pearson correlation between the evaluated parameters of maize populations under attack by *Sitophilus zeamais*.

	Antixenosis	Mortalidad	Pérdida de peso	Daño al grano
Antixenosis	1			
Mortalidad	-0,838*	1		
Pérdida de peso	0,831*	-0,860*	1	
Daño al grano	0,174	0,187	-0,187	1

*Correlación significativa a nivel 0,05 (bilateral).

Conclusiones

El ataque del picudo del maíz *Sitophilus zeamais* (Mostchulsky) sobre los granos de las diferentes poblaciones de maíces nativos de México evaluadas en la presente investigación, reveló que, a pesar de presentarse un porcentaje elevado en el número de granos dañados de las poblaciones de color, se pudo comprobar que la dureza del grano juega un papel importante para la penetración y ali-

mentación del insecto. Las poblaciones de color morado y azul generaron un mayor efecto positivo en la antixenosis, tolerancia (pérdida de peso y porcentaje de daño al grano) y mortalidad sobre *S. zeamais*. Esta investigación demuestra que los maíces nativos de color son una alternativa para el desarrollo de variedades mejoradas con características de resistencia ante el ataque *S. zeamais*, así como de conservar el rendimiento neto de los granos ya almacenados.

Referencias bibliográficas

- Acheampong A, Ayertey JN, Eziah VY, Ifie BE (2019). Susceptibility of selected maize seed genotypes to *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Stored Products Research* 81: 62-68. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.01.003>.
- Adebowale TJ, Osipitan AA, Pitan OR, Lawal OI, Joda AO, Filani CO, Ewedaio BI (2019). Resistance of some hybrid maize (*Zea mays* L.) to damage by maize weevil *Sitophilus zeamais* (Motsch.) (Coleoptera: Curculionidae) and larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae). *Nigerian Journal of Entomology* 35: 45-59. <https://doi.org/10.36108/nje/9102/53.01.50>.
- Arriaga-Pérez W, Gaytán-Martínez M, Reyes-Vega ML (2019). Métodos para medir la dureza del grano de maíz: review. *Digital Ciencia@UAQRO*, 2: 67-78.
- Astuti LP, Yahya SM, Hadi MS (2019). Susceptibility of six corn varieties (*Zea mays* L.) to *Sitophilus zeamais* Motschulsky (Coleoptera: Curculionidae). *International Journal of Plant Biology* 10: 9-13. <https://doi.org/10.4081/pb.2019.7441>.
- Broa Rojas E, Vázquez Carrillo MG, Estrella Chulím NG, Hernández Salgado JH, Ramírez Valverde B, Bahena Delgado G (2019). Características físico-químicas y calidad de la proteína de maíces nativos pigmentados de Morelos en dos años de cultivo. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 10: 683-697. <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i3.481>.
- Burgos-Díaz JA, Rangel-Fajardo MA, Tucuch-Haas JI, Benítez-Riquelme I, García-Zavala JJ (2020). Susceptibilidad de poblaciones nativas de maíz y preferencia del gorgojo en Yucatán, México. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas* 11: 1469-1479. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i7.2081>.
- Colombo R, Ferron L, Papetti A (2021). Colored corn: an up-date on metabolites extraction, health implication, and potential use. *Molecules* 26: 1-42. <https://doi.org/10.3390/molecules26010199>.
- Figuroa-Cárdenas JdeD, Narváez-González DE, Mauricio-Sánchez A, Taba S, Gaytán-Martínez M, Véles-Medina JJ, Rincón-Sánchez F, Aragón-Cuevas F (2013). Propiedades físicas del grano y calidad de los grupos raciales de maíces nativos (criollos) de México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 305-314. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-s3-a.305>.
- García-Lara S, Bergvinson DJ (2013). Identification of maize landraces with high level of resistance to storage pests *Sitophilus zeamais* Motschulsky and *Prostephanus truncatus* Horn in Latin America. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36: 347-356. <https://doi.org/10.35196/rfm.2013.3-s3-a.347>.
- García-Lara S, Chuck-Hernandez C, Serna-Saldivar SO (2019). Development And Structure Of The Corn Kernel. En: *Corn: Chemistry and Technology 3 Edition* (Ed. Serna-Saldivar SO), pp. 147-163. AACC International press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811971-6.00006-1>.
- Gaytán-Martínez M, Figuroa-Cárdenas JD, Reyes-Vega ML, Rincón-Sánchez F, Morales-Sánchez E (2006). Microstructure of starch granule related to kernel hardness in corn. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29: 135-139. Disponible en: <https://revistafitotecniamexicana.org/documentos/29-2 Especial 2/23a.pdf> (Consultado 25 enero 2022).
- Hernández-Alonso E, De León-Castillo H (2021). Comportamiento genético para componentes de rendimiento en una población de maíz enano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 26: 131-144. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2943>.
- Hernández-Cruz J, Luna-Cruz A, Loera-Alvarado E, Villanueva-Sánchez E, Landero-Valenzuela N, Zárate-Nicolás BH, Granados-Echegoyen CA (2019). Efficiency of the essential oil of *Porophyllum linaaria* (Asteraceae) a Mexican endemic plant against *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae). *Journal of Insect Science* 2019: iez079. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iez079>.
- Hong KJ, Lee W, Park YJ, Yang JO (2018). First confirmation of the distribution of rice weevil, *Sitophilus oryzae*, in South Korea. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity* 11: 69-75. <https://doi.org/10.1016/j.japb.2017.12.005>.

- Ileke KD, Idoko JE, Ojo DO, Adesina BC (2020). Evaluation of botanical powders and extracts from Nigerian plants as protectants of maize grains against maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) [Coleoptera: Curculionidae]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 27: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101702>.
- Joshi A, Adhikari S, Singh NK (2021). Mapping genomic regions for red flour beetle (*Tribolium castaneum* (Herbst)) resistance in teosintle (*Zea mays* L. subsp. *parviglumis* H. H. Iltis & Doebley) derived maize backcross inbred line population. *Genetic Resources and Crop Evolution* 68: 1529-1544. <https://doi.org/10.1007/s10722-020-01083-3>.
- Khakata S, Mbuthe FN, Chemining'wa GN, Mwimali M, Karanja J, Harvey J, Mwololo JK (2018). Post-harvest evaluation of selected inbred lines to maize weevil *Sitophilus zeamais* resistance. *Journal of Plant Breeding and Crop Science* 10: 105-114. <https://doi.org/10.5897/jpbcs2017.0646>.
- Kim JT, Chung IM, Kim MJ, Lee JS, Son BY, Bae HH, Go YS, Kim SL, Baek SB, Kim SH, Yi G (2022). Comparison of antioxidant activity assays in fresh purple waxy corn (*Zea mays* L.) during grain filling. *Applied Biological Chemistry* 65: 1-7. <https://doi.org/10.1186/s13765-021-00671-w>.
- López-Castillo LM, Silva-Fernández SE, Winkler R, Bergvinson DJ, Arnason JT, García-Lara S (2018). Postharvest insect resistance in maize. *Journal of Stored Products Research* 77: 66-76. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.03.004>.
- Mamoon-Ur-rashid M, Riaz-Ud-din, Naeem M, Khan MA, Ashfaq M (2021). Relative resistance of maize varieties against maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky), (coleoptera: Curculionidae). *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 58: 1169-1176. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/21.45>.
- Mejía AL, Núñez JM, Gallegos B, Cuadra JA, Castillo GU (2022). "Atol Shuco", a traditional corn-fermented salvadorian beverage: phytochemical, microbiological and nutritional considerations. In *Hispanic Foods: Chemistry of Fermented Foods* (Ed. Tunick MH, González de Mejía E), pp. 29-48. American Chemical Society. USA. <https://doi.org/10.1021/bk-2022-1406.ch003>.
- Nhamucho E, Mugo S, Gohole L, Tefera T, Kinyua M, Mulima E (2017). Resistance of selected Mozambican local and improved maize genotypes to maize weevil, *Sitophilus zeamais* (Motschulsky). *Journal of Stored Products Research* 73: 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.07.003>.
- NMX-FF-034/1-SCFI-2002. Productos alimenticios no industrializados para consumo humano – cereales – parte i: maíz blanco para proceso alcalino para tortillas de maíz y productos de maíz nixtamalizado-especificaciones y métodos de prueba. Disponible en: http://sitios1.dif.gob.mx/alimentacion/docs/NMX-FF-034-1-SCFI-2002_MAIZ_blanco.pdf (Consultado 10 octubre 2021).
- Nwosu LC (2016). Chemical bases for maize grain resistance to infestation and damage by the maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky. *Journal of Stored Products Research* 69: 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.06.001>.
- Odjo S, Palacios-Rojas N, Burgueño J, Corrado M, Ortner T, Verhulst N (2022). Hermetic storage technologies preserve maize seed quality and minimize grain quality loss in smallholder farming systems in Mexico. *Journal of Stored Products Research* 96: 101954. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2022.101954>.
- Palacios-Pola G, Perales Rivera H, Figueroa-Cárdenas JdeD, Hernández Estrada ZJ (2021). Changes in the physical, chemical, and sensory properties from three native corn landraces from Chiapas using two nixtamalization times. *International Journal of Gastronomy and Food Science* 25: 100373. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2021.100373>.
- Rahardjo BT, Astuti LP, Sugiarto AN, Rizali A (2017). Susceptibility of maize genotypes to maize weevil *Sitophilus zeamais* Motsch. (Coleoptera: Curculionidae). *AGRIVITA Journal of Agricultural Science* 39: 329-334. <https://doi.org/10.17503/agrivita.v39i3.1278>.
- Rathna Priya TS, Manickavasagan A (2021). Characterising corn grain using infrared imaging and spectroscopic techniques: a review. *Journal of Food Measurement and Characterization* 15: 3234-3249. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00898-7>.

- Rodríguez-Ledesma Y, Mirabal-García R, Suárez-Pérez C, García-González TM, Albert-Rodríguez A, Orrantia-Cárdenas I (2017). Control de *Sitophilus zeamais* Motschulsky con polvo de mármol en granos de maíz almacenados. Pastos y forrajes 40: 296-301. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=269158176006> (Consultado 03 febrero 2022).
- Sandhu KS, Singh N, Malhi NS (2007). Some properties of corn grains and their flours I: Physicochemical, functional and chapati-making properties of flours. Food Chemistry 101: 938-946. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.02.040>.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) 2022. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Consultado 14 abril 2022).
- Stuhl CJ (2019). Does prior feeding behavior by previous generations of the maize weevil (Coleoptera: Curculionidae) Determine future descendants feeding preference and ovipositional suitability? Florida Entomologist 102: 366-372. <https://doi.org/10.1653/024.102.0212>.
- Suleiman R, Rosentrater KA, Bern CJ (2015). Evaluation of maize weevils *Sitophilus zeamais* Motschulsky infestation on seven varieties of maize. Journal of Stored Products Research 64: 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2015.09.005>.
- Tefera T, Mugo S, Tende R, Likhayo P (2011). Methods of screening maize for resistance to stem borers and post-harvest insect pests. International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT). Nairobi, Kenya.
- Trematerra P, Ianiro R, Athanassiou CG, Kavallieratos NG (2014). Behavioral interactions between *Sitophilus zeamais* and *Tribolium castaneum*: the first colonizer matters. Journal of Pest Science 88: 573-581. <https://doi.org/10.1007/s10340-014-0633-z>.
- Ugagu GM, Nwoke BEB, Opara NK, Onwubuche BC, Isiaka PI, Nwosu LC, Eluwa AN, Ajayi OA, Petgrave GM, Aguwa UO (2021). Investigations on the inherent resistance of twenty-one maize varieties to maize weevil, *Sitophilus zeamais* Motschulsky at F2 generation. Asian Journal of Advances in Research 8: 21-31. Disponible en: <https://mbimph.com/index.php/AJOAIR/article/view/2189/1916> (Consultado 17 mayo 2022).
- Usseglio VL, Dambolena JS, Merlo C, Peschiutta ML, Zunino MP (2018). Insect-corn kernel interaction: Chemical signaling of the grain and host recognition by *Sitophilus zeamais*. Journal of Stored Products Research 79: 66-72. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2018.08.002>.
- Velásquez-Salazar R, Diamont D (2014). Micro-morfología de la epidermis foliar de cultivares de arroz Venezolano (Poaceae) asociado con el daño mecánico de sogata *Tagosodes orizicolus* (Homoptera: Delphacidae). Revista de Biología Tropical 62: 819-827. <https://doi.org/10.15517/rbt.v62i2.10360>.
- Velázquez-Salazar M, Scalzo G, Shanks CB (2021). Colored heirloom corn as a public good: The case of Tlaxcala, México. Sustainability 13: 1507. <https://doi.org/10.3390/su13031507>.
- Žilić S, Nikolić V, Mogol BA, Hamzalioglu A, TaşNG, Kocadağlı T, Simić M, Gökmen V (2022). Acrylamide in corn-based thermally processed foods: a review. Journal of Agricultural and Food Chemistry 70: 4165-4181. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c07249>.
- Zunjare R, Hossain F, Muthusamy V, Jha SK, Kumar P, Sekhar JC, Guleria SK, Singh NK, Thirunavukarasu N, Gupta HS (2015). Genetics of resistance to stored grain weevil (*Sitophilus oryzae* L.) in maize. Cogent Food and Agriculture 1: 1075934. <https://doi.org/10.1080/23311932.2015.1075934>.

(Aceptado para publicación el 22 de enero de 2023)