

Efectos subletales asociados a la resistencia a indoxacarb en la palomilla dorso de diamante

Sublethal effects associated with resistance to indoxacarb in diamondback moth

José Francisco Rodríguez-Rodríguez^{1*}, Ernesto Cerna-Chávez², Yisa María Ochoa-Fuentes², Sarahyt Santamaría González-Figueroa¹, Luis Patricio Guevara-Acevedo³, Hugo Cesar Cisneros-López³

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Bajío. Carretera Celaya-San Miguel de Allende Km 6.5. CP. 38010. Celaya, Guanajuato, México.

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista. CP. 25315. Saltillo, Coahuila, México.

³Instituto Nacional de México, Instituto Tecnológico de Roque, Carretera Celaya-Juventino Rosas Km 8. CP. 38110, Celaya, Guanajuato, México.

*Autor de correspondencia: francisco_azul@live.com.mx

Artículo científico

Recibido: 11 de septiembre 2023

Aceptado: 13 de diciembre 2023

RESUMEN. *Plutella xylostella* es una plaga de las más importantes en los cultivos de brassicáceas alrededor del mundo. El indoxacarb se utiliza ampliamente para el control de larvas de lepidópteros plaga. Este insecticida presenta una actividad lenta y efectos residuales prolongados los cuales impactan los hábitos y la fisiología de las plagas. Como objetivo se estableció la evaluación del efecto de concentraciones subletales de indoxacarb en la biología y tiempo de desarrollo de la palomilla dorso de diamante. Se realizó presión de selección del insecticida indoxacarb sobre *P. xylostella*, aplicando la CL_{20} de la generación anterior por las siguientes diez generaciones, se calculó la CL_{20} de la línea resistente (G_{10}) y posteriormente se aplicó esta concentración a larvas de L3. Se evaluó el efecto en el porcentaje y peso de pupas, emergencia de adultos y oviposición para dos generaciones; además, del tiempo de desarrollo de huevo, larva, pupa y adulto. Los resultados mostraron que la resistencia y la exposición a CL_{20} de indoxacarb provocaron cambios en la biología y el desarrollo de *P. xylostella*. Esto se manifestó en un aumento del porcentaje y peso de pupas formadas y emergencia de adultos, junto con una prolongación del tiempo de desarrollo de más de 10 días. Sin embargo, se observó una disminución de más del 50% en el número de huevos por hembra.

Palabras clave: Insecticidas, biología, transgeneracional, *Plutella xylostella*.

ABSTRACT. *Plutella xylostella* is one of the most important pests of brassicaceous crops around the world. Indoxacarb is widely used to control lepidopteran pest larvae. This insecticide has slow activity and prolonged residual effects which impact the habits and physiology of pests. The objective was to evaluate the effect of sublethal concentrations of indoxacarb on the biology and development time of the diamondback moth. Selection pressure of the insecticide indoxacarb was carried out on *P. xylostella*, applying the LC_{20} of the previous generation for the next ten generations, the LC_{20} of the resistant line (G_{10}) was calculated and this concentration was subsequently applied to L3 larvae. The effect on the percentage and weight of pupae, adult emergence and oviposition for two generations was evaluated; in addition, the development time of egg, larva, pupa and adult. The results showed that resistance and exposure to LC_{20} of indoxacarb caused changes in the biology and development of *P. xylostella*. This was manifested in an increase in the percentage and weight of formed pupae and emergence of adults, along with a prolongation of development time of more than 10 days. However, a decrease of more than 50% in the number of eggs per female was observed.

Key words: Insecticides, biology, transgenerational, *Plutella xylostella*.

Como citar: Rodríguez-Rodríguez JF, Cerna-Chávez E, Ochoa-Fuentes YM, González-Figueroa SS, Guevara-Acevedo LP, Cisneros-López HC (2024) Efectos subletales asociados a la resistencia a indoxacarb en la palomilla dorso de diamante. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 11(1): e3888. DOI: 10.19136/era.a11n1.3888.

INTRODUCCIÓN

La palomilla dorso de diamante (*Plutella xylostella* L.) es la plaga de lepidópteros más destructiva en cultivos de brassicáceas (Li *et al.* 2016). Debido a sus características biológicas y de comportamiento, tales como una elevada tasa de reproducción, traslape de generaciones, disponibilidad de plantas hospederas, alta migración, alto polimorfismo y flujo de genético (Kang *et al.* 2017), combinado con el uso excesivo de insecticidas para su control, *P. xylostella* ha desarrollado resistencia a diversas moléculas de síntesis química (Pu *et al.* 2010, Yin *et al.* 2019). Actualmente, se han reportado 1 022 casos de resistencia a insecticidas de *P. xylostella* a 101 moléculas químicas activas destacando algunos piretroides, avermectinas, spinosinas, diamidas, oxadiazinas y diferentes cepas de *Bacillus thuringiensis* (Mota-Sanchez y Wise 2023). *P. xylostella* fue la primera especie en desarrollar resistencia al indoxacarb en el año 2001 (Zhao 2002) y en la actualidad, la resistencia a este químico en poblaciones de campo de *P. xylostella* se ha reportado a un nivel de medio a alto (Wang *et al.* 2016). Indoxacarb es un insecticida del grupo de las oxadiazinas, se usa ampliamente para el control de larvas de lepidópteros (Wing *et al.* 2010), tras su ingestión bloquea irreversiblemente los canales de sodio sensibles al voltaje en el sistema nervioso central de los insectos (Sardar *et al.*, 2023), lo que provoca que se dejen de alimentar, causándoles una parálisis y posteriormente la muerte, sin embargo, este tóxico se considera de acción lenta y residual (Wang *et al.* 2023a). Puede llegar a afectar el comportamiento y la fisiología de los insectos de manera crónica (Wang *et al.* 2011), afectando la morfología, peso de las pupas, longevidad, alimentación, fecundidad (Zhang *et al.* 2022) y diversos procesos fisiológicos y bioquímicos de los insectos, así como favorecer el desarrollo de la resistencia a los insecticidas (Quan *et al.* 2016). Anteriormente se han reportado que la aplicación de una concentración subletal de un insecticida causa reducciones significativas en el crecimiento, fecundidad, fertilidad y tiempo de desarrollo de los insectos (Rehan y Freed 2015). También altera procesos metabólicos de carbohidratos, proteínas y lípidos (Vojoudi *et al.* 2017), así como alteraciones a nivel genético dado que la expresión de genes se pueda dar por la aplicación de concentraciones subletales de insecticidas (Bauer *et al.* 2013). La estructura genética de los insectos influye para determinar su capacidad de adaptación en ambientes adversos y a nuevas condiciones de desarrollo (Verhoeven *et al.* 2011). El objetivo del presente estudio fue evaluar el impacto de concentraciones subletales de indoxacarb en la fisiología y tiempo desarrollo *P. xylostella*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Colonias de insectos

Se utilizó una población de campo que se colectó en lotes comerciales del cultivo de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* Plenck) en Valle de Santiago, Guanajuato, México. Los individuos colectados se mantuvieron en condiciones de laboratorio ($27 \pm 1^\circ\text{C}$, $80 \pm 1\%$ HR, 16:8 h L:O) con presión de selección del insecticida indoxacarb a lo largo de diez generaciones (G_{10}). Se utilizaron plantas de *B. oleracea* var. *italica* para alimentar a las larvas. La dieta de los adultos fue a base de agua más miel a una concentración del 16%. Los individuos de la línea susceptible se proporcionaron por Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo

Experimental Bajío, los cuales fueron mantenidos en condiciones de laboratorio sin selección a insecticidas por más de 27 años.

Bioensayos

La determinación de la efectividad biológica de indoxacarb se realizó por el método de prueba 018 propuesto por el IRAC (2019). Se evaluaron seis concentraciones del insecticida (150, 100, 50, 10, 1 y 0.1 mg L⁻¹) las cuales fueron incrementado de acuerdo al desarrollo de resistencia y un testigo absoluto (agua + adherente). Las concentraciones se prepararon con agua desionizada y adherente (1 mL L⁻¹). Discos de hojas de brócoli de 6 cm de diámetro se trataron por el método de inmersión durante 10 s en las soluciones evaluadas, para la eliminación del exceso de humedad las hojas se colocaron sobre papel absorbente durante 1 h a temperatura ambiente, posteriormente se colocaron en cajas Petri preparadas con papel absorbente humectado con agua corriente, esto para mantener la turgencia de la hoja durante el bioensayo. Utilizando un pincel de pelo de camello del número triple cero se colocaron 10 larvas de L3 en cada disco de hoja. La mortalidad se registró 24 h después de iniciar el experimento; el criterio de mortalidad consistió en realizar un estímulo con un pincel en el dorso de las larvas y aquellas que no reaccionaron a la provocación se consideraron muertas. Este procedimiento se realizó durante 10 generaciones, donde ya no se presentaron diferencias en la respuesta de la CL₅₀ del insecticida. El experimento se llevó a cabo mediante un diseño experimental completamente al azar con seis concentraciones y cinco repeticiones, y cada repetición estuvo constituida de un disco de hoja con 10 larvas L3.

Efectos subletales

Desarrollada la población resistente se continuo a determinar los efectos subletales de indoxacarb, 10 larvas L3 se transfirieron a una hoja tratada con la CL₂₀ de la G₁₀, el diseño experimental utilizado durante el experimento fue completamente al azar y 10 repeticiones para cada tratamiento, la unidad experimental estuvo constituida por una hoja con 10 individuos. Las larvas se alimentaron por un periodo de 24 h, transcurrido este tiempo la hoja se cambió por una sin tratar y a los individuos vivos se les dio seguimiento hasta emergencia de adultos, las variables evaluadas para esta generación fueron: peso de pupas (PP), % de pupas formadas (PF), adultos emergidos (AE) y proporción de sexos (PS). A los adultos emergidos se les determino el sexo y se agruparon en 10 parejas, se colocaron en cámaras de oviposición que consistieron en cajas Petri preparadas con papel absorbente humectado con agua y un círculo de hoja de brócoli, esto para la copulación y oviposición, cada 24 h se tomó registro de los huevos ovipositados hasta la muerte de las hembras. Para la alimentación de los adultos se les suministro solución de agua más miel al 16%. Para determinar el tiempo de desarrollo de huevo hasta adulto se transfirieron 100 huevos tomados de manera aleatoria de las parejas de adultos antes formadas a hojas de brócoli previamente colocadas en cajas Petri preparadas con papel absorbente humectado con agua. El diseño experimental fue completamente al azar y 10 repeticiones, considerando a una hoja con diez huevos como unidad experimental. Se registró la duración en días de cada una de las fases: huevo, L1, L2, L3, L4, pupa y adulto. Cuando las pupas cumplieron 48 h de edad, se seleccionaron 10 ejemplares de forma aleatoria y con ayuda de una balanza analítica se pesaron. En el caso de los adultos emergidos se sexaron y se calculó el número de hembras por macho, así como su tiempo de vida y en el caso de las hembras su tasa de oviposición. El experimento se llevó a cabo

en condiciones de laboratorio a una humedad relativa de $80 \pm 10\%$, temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ y fotoperiodo de 16:8 h.

Análisis estadístico

Con el porcentaje de mortalidad obtenido en las pruebas de resistencia se realizó un ajuste de corrección de mortalidad como lo propone Abbott (1925), seguido de una regresión lineal Probit (Finney 1971), utilizando el programa estadístico SAS System for Windows ver 9.0 (SAS 2016). Para determinar el factor de resistencia se dividió la CL_{50} de línea resistente entre la CL_{50} de la línea susceptible, la resistencia se clasificó de acuerdo al estándar establecido por Shen *et al.* (1991), poblaciones de insectos con un factor de resistencia superior a 10 son consideradas resistentes. Los efectos subletales en la duración del tiempo desarrollo de cada una de las fases, PF, PP, AE, PS y la oviposición se sometieron a la prueba Shapiro & Wilk para calcular el comportamiento de los datos, una vez confirmada la normalidad de los datos se realizó a un análisis de varianza (ANVA), la separación de las medias se realizó con la prueba de Tukey ($\alpha < 0.05$). Los análisis estadísticos se realizaron con el programa estadístico R-studio, versión 3.3.1 (R Core Team 2023).

RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los resultados de la concentración letal media y la proporción de resistencia observada en diez generaciones de *P. xylostella* bajo presión de selección del insecticida indoxacarb. La línea susceptible (LS) presentó una CL_{50} de 11.28 mg L^{-1} , mientras que, la primera generación (G_1) muestra una CL_{50} de 43.99 mg L^{-1} , lo que representa un factor de resistencia de 3.90 veces mayor a la LS. Después de diez generaciones de selección de resistencia, se obtuvo una CL_{50} de $2\,099 \text{ mg L}^{-1}$, lo que resulto en una proporción de resistencia de 186.06 veces más en comparación a la LS.

Obtenida la línea resistente (LR) a indoxacarb, se determinaron los efectos biológicos de la resistencia a dicho insecticida para dos generaciones (progenitores y descendientes) de *P. xylostella*. El PF se ve influenciado directamente en los progenitores por la resistencia y la aplicación de CL_{20} de indoxacarb al disminuirse en comparación a la LS (Figura 1). La LS presenta una media de pupación del 95%, mientras que, la línea susceptible con exposición al insecticida ($LSCL_{20}$), LR y la línea resistente con exposición al insecticida ($LRCL_{20}$) muestra valores de 51, 72 y 56%, respectivamente; sin embargo, el efecto del insecticida en la generación de descendientes es contrario a lo reportado en los progenitores ya que el porcentaje de pupas se ve aumentado en los tratamientos $LSCL_{20}$, LR y $LRCL_{20}$ con porcentajes de 84, 90 y 59%, respectivamente. Respecto a la EA (Figura 1) de la LS, LR y $LRCL_{20}$ no mostraron diferencia significativa entre ellas, al superar en todos los casos el 85% de adultos emergidos, mientras que, la $LSCL_{20}$ se vio disminuida más de un 30% para los progenitores. Respecto a los descendientes la LS, LR y $LRCL_{20}$ mostraron porcentaje superiores al 80%, por su parte, la $LSCL_{20}$ presentó una reducción de más del 65% en comparación a los demás tratamientos.

Tabla 1. Concentración letal media y proporción de resistencia de la presión de selección del insecticida indoxacarb en 10 generaciones de *Plutella xylostella*.

Gen ^a	N	GL ^b	CL ₅₀ (LFI - LFS) mg L ⁻¹	CL ₂₀ (LFI - LFS) mg L ⁻¹	Ecu. Predicción	X ²	PR ^c
LS ^d	300	4	11.28 (4.87 - 24.80)	0.77 (0.14 - 2.09)	y = 0.01 - 0.008x	0.05	-
G ₁	300	4	43.99 (22.64 - 86.54)	1.09 (0.47 - 2.02)	y = 0.007 - 0.003x	0.18	3.90
G ₂	300	4	97.04 (22.52 - 280.33)	8.00 (0.03 - 30.03)	y = 0.15 - 0.06x	0.001	8.60
G ₃	300	4	131.79 (86.62 - 181.88)	57.71 (25.53 - 87.56)	y = 0.65 - 0.28x	0.0003	11.68
G ₄	300	4	456.63 (294.35 - 1,528)	203.86 (45.21 - 314.49)	y = 2.97 - 1.17x	0.0001	40.48
G ₅	300	4	529.96 (293.57 - 1,400)	160.56 (12.71 - 290.77)	y = 1.19 - 0.44x	0.0001	48.11
G ₆	300	4	466.09 (337.22 - 620.99)	198.79 (96.49 - 285.64)	y = 0.79 - 0.29x	0.01	41.32
G ₇	300	4	575.62 (504.64 - 644.47)	263.48 (199.51 - 320.40)	y = 0.51 - 0.17x	0.58	51.03
G ₈	300	4	727.91 (686.40 - 793.47)	435.00 (386.70 - 478.35)	y = 0.61 - 0.21x	0.26	64.53
G ₉	300	4	1 479 (1 083 - 3 075)	610.19 (187.07 - 864.23)	y = 2.97 - 1.17x	0.004	131.12
G ₁₀	300	4	2 099 (1 648 - 2 902)	1 265 (557.42 - 1 620)	y = 8.09 - 2.45x	0.002	186.06

^aGeneración; ^bGrados de libertad; ^cProporción de resistencia (CL₅₀ de Línea resistente / CL₅₀ de línea susceptible); ^dLínea susceptible. LFI: Límite fiducial inferior; LFS: Límite Fiducial Superior.

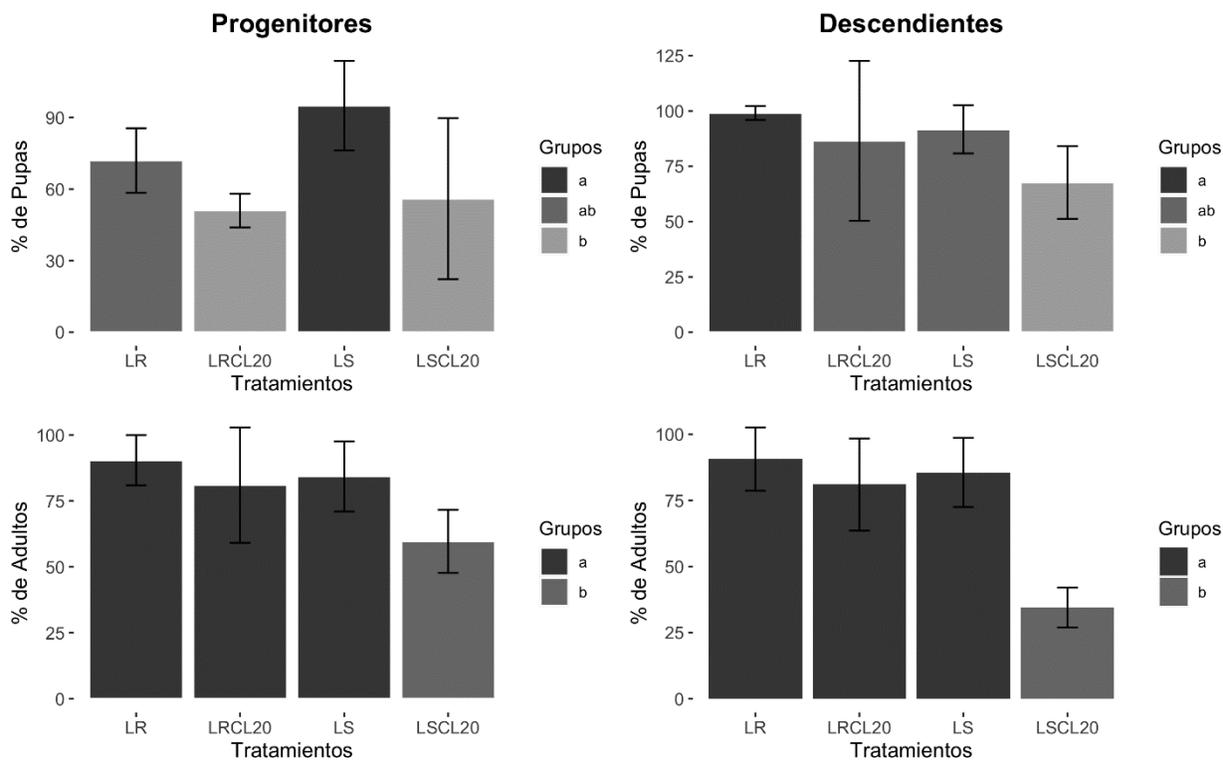


Figura 1. Comparación de medias de los efectos subletales de indoxacarb en el porcentaje de pupas formadas y adultos emergidos de *Plutella xylostella*.

El PP de *P. xylostella* también presentó efectos a causa del desarrollo de resistencia y a la exposición de CL₂₀ de indoxacarb para ambas generaciones (Tabla 2). En la generación progenitores la LR y LRCL₂₀ presentaron los valores más altos con un peso medio de 6.60 y 7.10 mg respectivamente, en tanto que la LSCL₂₀ muestra la media más baja con 2.92 mg, pero en los descendientes estos valores aumentaron a 10.00 y 10.50 mg para la LR y LRCL₂₀, respectivamente, y a 4.13 para LSCL₂₀. Para la PS (hembras por macho) no muestran diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos en estudio para ambas generaciones (Tabla 2).

Tabla 2. Comparación de medias de efectos subletales de indoxacarb en el peso de pupas y la proporción sexual de *Plutella xylostella*.

Trat ¹	Progenitores		Descendientes	
	Peso de Pupas (mg) (Media ± DE ³)	PS ² (Media ± DE ³)	Peso de Pupas (mg) (Media ± DE ³)	PS ² (Media ± DE ³)
LS ⁴	4.73 ± 0.802ab	1.36 ± 0.92a	4.19 ± 0.69b	1.92 ± 1.25a
LS ⁴ (CL ₂₀)	2.92 ± 1.07b	1.70 ± 1.47a	4.13 ± 1.26b	1.00 ± 0.62a
LR ⁵	6.60 ± 1.89a	1.05 ± 0.69a	10.00 ± 3.43a	1.42 ± 1.42a
LR ⁵ (CL ₂₀)	7.10 ± 3.34a	0.90 ± 0.63a	10.50 ± 2.71a	1.20 ± 0.57a

Medias con diferente letra dentro de cada columna son significativamente diferentes entre si (Tukey, $p > 0.05$); ¹Tratamientos; ²Porporción sexual (hembras por macho); ³Desviación estándar; ⁴Línea susceptible; ⁵ Línea resistente.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos sobre los efectos de la resistencia y aplicación de dosis subletales de indoxacarb en la oviposición de *P. xylostella*. La resistencia generada a causa de este insecticida en los progenitores presenta un aumento en la oviposición total en más de un 20% en comparación a la LS, sin embargo, al aplicar dosis subletales tanto en la LS como en LR esta se ve reducida en 38 y 29.5%, respectivamente, en comparación a los tratamientos sin aplicar. Para el caso de los descendientes la oviposición total se ve disminuida en LSCL₂₀, LR y LRCL₂₀ con valores medios de 104.2, 101.4 y 61.25 huevos, respectivamente, en comparación a LS que presenta una media de 145.80.

Tabla 3. Comparación de medias de efectos subletales de indoxacarb en la oviposición de *Plutella xylostella*.

Trat ¹	Progenitores		Descendientes	
	HHD ² (Media ± DE ³)	Total (Media ± DE ³)	HHD ² (Media ± DE ³)	Total (Media ± DE ³)
LS ⁴	34.04 ± 1.55a	140.20 ± 8.10ab	27.16 ± 3.55a	145.80 ± 15.46a
LS ⁴ (CL ₂₀)	15.65 ± 6.14c	86.20 ± 41.14b	28.00 ± 17.39a	104.2 ± 41.90ab
LR ⁵	25.36 ± 4.86b	184.20 ± 41.39a	28.03 ± 10.22a	101.40 ± 31.67ab
LR ⁵ (CL ₂₀)	20.07 ± 3.72bc	130.00 ± 63.78ab	9.33 ± 4.75b	61.25 ± 38.71b

Medias con letra diferente dentro de cada columna son significativamente diferentes entre si (Tukey, $p > 0.05$); ¹Tratamientos; ²Huevos por hembra por día; ³Desviación estándar. ⁴Línea susceptible; ⁵ Línea resistente.

El tiempo de desarrollo de *P. xylostella* mostró alteraciones debido a la resistencia y aplicación de CL₂₀ de indoxacarb como se muestra en la Tabla 4 al presentar diferencia significativa en cada una de las fases de vida en los tratamientos en estudio. La LS presentó un tiempo total de desarrollo de 17.81 días, por su parte, la LR muestra un tiempo de desarrollo de 28.2 días, sin embargo, al aplicar una dosis subletal los tiempos de desarrollo se ven aumentados a 19.7 y 29.8 días para la LSCL₂₀ y LRCL₂₀, respectivamente.

Tabla 4. Comparación de medias de efectos subletales de indoxacarb en las fases de desarrollo de *Plutella xylostella*.

Fase	Tratamientos			
	LS ² (Media ± DE ¹)	LS ² (CL ₂₀) (Media ± DE ¹)	LR ³ (Media ± DE ¹)	LR ³ (CL ₂₀) (Media ± DE ¹)
Huevo	3.55 ± 0.39b	3.74 ± 0.23b	4.07 ± 0.16b	5.96 ± 1.36a
L1	1.08 ± 0.17b	2.49 ± 0.41a	2.77 ± 0.70a	1.20 ± 0.42b
L2	1.83 ± 0.33b	3.02 ± 0.17a	3.87 ± 1.11a	3.92 ± 1.12a
L3	1.91 ± 0.41b	1.70 ± 0.16b	3.17 ± 0.58a	2.32 ± 1.46ab
L4	1.79 ± 0.27a	2.08 ± 0.23a	1.99 ± 0.50a	2.13 ± 0.17a
Pupa	4.05 ± 0.90b	4.40 ± 0.48b	5.78 ± 0.60a	5.56 ± 0.41a
Adulto	3.57 ± 0.47c	5.97 ± 0.56b	5.50 ± 0.74b	8.70 ± 0.71a
Hembra	4.41 ± 0.79c	5.45 ± 0.55c	7.00 ± 1.49b	8.40 ± 1.26a
Macho	2.89 ± 0.89c	6.49 ± 0.69b	6.00 ± 2.30b	9.00 ± 0.66a
Total	17.81 ± 0.99b	19.66 ± 0.66b	28.16 ± 1.90a	29.80 ± 2.38a

Medias con letra diferente dentro de cada fila son significativamente diferentes entre sí (Tukey, $p > 0.05$); ¹Desviación estándar. ²Línea susceptible; ³Línea resistente.

DISCUSIÓN

Plutella xylostella es una plaga reconocida por su rápido desarrollo de resistencia a insecticidas en periodos cortos de tiempo; en la presente investigación se realizó presión de selección de indoxacarb durante G₁₀ de una línea proveniente de campo de palomilla dorso de diamante, se desarrolló una proporción de resistencia de 186.1 veces más que la LS. Estos resultados difieren a lo reportado por Nehare *et al.* (2010), quienes obtuvieron una proporción de resistencia de 31.3 al realizar una selección de resistencia de indoxacarb por diez generaciones de una población de campo de *P. xylostella*, similar a lo reportado por Rodríguez-Rodríguez *et al.* (2021) quienes obtuvieron un factor de resistencia de 33.3 al realizar presión de selección durante diez generaciones con abamectina. Sin embargo, en otro estudio realizado con indocaxarb se reportan valores superiores a los de este estudio con un factor de resistencia de 238.4 bajo una selección de resistencia de 14 generaciones de *P. xylostella* (Marak *et al.* 2017).

Los plaguicidas de síntesis química se degradan de manera gradual después de la aplicación en el campo y las plagas a menudo se exponen a bajas concentraciones de estos productos (Da-Silva *et al.* 2021). La exposición de concentraciones subletales de insecticidas altera los procesos bioquímicos y fisiológicos, lo que provoca cambios biológicos en la reproducción, la longevidad, la duración de las etapas de desarrollo que tienen impactos negativos en la dinámica poblacional de las plagas (Guedes *et al.* 2016). Los resultados de esta investigación demuestran que la exposición de concentraciones subletales de indoxacarb presentan alteraciones biológicas y de desarrollo en la palomilla dorso de diamante. Mahmoudvand *et al.* (2011) reportaron que, al aplicar concentraciones subletales, CL₁₀ y CL₂₅, de indoxacarb sobre larvas de *P. xylostella* el porcentaje de pupas se disminuyó en un 26 y 31% respectivamente, mientras que, la tasa de adultos emergidos se redujo en más del 30%. Por su parte Song *et al.* (2013) reportaron una decreción del 16 y 12% para las pupas formadas y adultos emergidos al exponer larvas de *P. xylostella* a una CL₃₀ de este mismo insecticida. Así mismo Moustafa *et al.* (2023) en un estudio sobre los efectos subletales de indoxacarb sobre *Mamestra brassicae* obtuvieron una reducción en la tasa de pupación de un 15.7% al aplicar una CL₃₀. Investigaciones previas han demostrado que la exposición de concentraciones subletales de indoxacarb (Mahmoudvand *et al.* 2011), spinosad (Yin *et al.* 2008), clorraniliprol (Han *et al.* 2012), cipermetrina (Song *et al.* 2013) y fipronil (Rodríguez-Rodríguez *et al.* 2020) reducen el peso de las pupas en líneas de campo de *P. xylostella*. La oviposición de *P. xylostella* se ve afectada a causa de la resistencia al aumentar el número total de huevos, sin embargo, al aplicar concentraciones subletales la tasa de ovoposición se ve disminuida en más de un 30% en comparación a la LS. Lo anterior, coincide con lo reportado por Mahmoudvand *et al.* (2011) y Song *et al.* (2013) haciendo referencia que la aplicación de concentraciones subletales de indoxacarb disminuyen la tasa de ovoposición en hembras de *P. xylostella* en más de un 20%. Una investigación reciente confirma que la aplicación de dosis subletales (CL₂₅) de indoxacarb presena efectos significativos sobre la oviposición de *P. xylostella* (Wang *et al.* 2023b). Al respecto, Wang *et al.* (2011) reportan que la resistencia a indoxacarb en la *P. xylostella* aumenta el número de huevos por hembra en un en más del 7%. En lo que se refiere al tiempo de desarrollo estudios previos han demostrado que la aplicación concentraciones bajas de indoxacarb aumentan de manera considerable la duración de las etapas de desarrollo de las plagas de lepidópteros como *Plutella xylostella* (Mahmoudvand *et al.* 2011) y *Helicoverpa armígera* (Vojoudi *et al.* 2017).

La exposición de concentraciones subletales de indoxacarb en los insectos disminuye el contenido de glucosa y proteínas (Vojoudi *et al.* 2017); considerando que las proteínas son importantes en los procesos fisiológicos de los insectos como la metamorfosis, el crecimiento y la reproducción (Sugumaran 2010); en ocasiones la biosíntesis de estos compuestos se ve afectada a causa del estrés químico como es la aplicación de insecticidas (Bashari *et al.* 2014). Mientras que, Liu *et al.* (2013) suscriben que la aplicación de indoxacarb reduce de manera significativa el contenido de proteínas en ovarios y en el cuerpo graso de hembra, sitio donde se lleva a cabo la síntesis de vitelogenina que son moléculas precursoras de la principal proteína (vitelina) contenida en los huevos (Tufail y Takeda 2008). La síntesis de vitelogenina está regulada principalmente por la hormona juvenil (Richard *et al.* 2001) que es la más importante en los insectos ya que tiene efectos en el desarrollo y crecimiento larval, la metamorfosis y la reproducción (Harshman *et al.* 2010).

CONCLUSIONES

P. xylostella muestra una gran capacidad para desarrollo resistencia a indoxacarb en menos de 3 generaciones con un factor de resistencia de 11.68 veces y durante 10 generaciones su factor de resistencia aumentó en 186.1 veces. La resistencia y la aplicación CL₂₀ de indoxacarb alteran la biología de *P. xylostella* al aumentar el PF, AE, así como el PP, el tiempo de desarrollo también se alarga en más de 10 días; a pesar de que la resistencia y la aplicación CL₂₀ disminuye la oviposición de *P. xylostella*.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaramos que no existe conflicto de interés en competencia.

LITERATURA CITADA

- Abbott WS (1925) A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal Economic Entomology* 18: 265-267. <https://doi.org/10.1093/jee/18.2.265a>
- Bashari E, Ghadamyari M, Sendi JJ (2014) Toxicity, and biological and biochemical effects of hexaflumuron on the elm leaf beetle, *Xanthogaleruca luteola* (Col.: Chrysomelidae). *Journal of Entomological Society of Iran* 34: 35-46.
- Bauer M, Greenwood SJ, Clark KF, Jackman P, Fairchild W (2013) Analysis of gene expression in *Homarus americanus* larvae exposed to sublethal concentrations of endosulfan during metamorphosis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part D: Genomics and Proteomics* 8: 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.cbd.2013.07.002>
- Finney DJ (1971) *Probit Analysis*. 3rd Edition. Cambridge at the University Press. Cambridge, UK. 120p.
- Guedes RNC, Smagghe G, Stark JD, Desneux N (2016) Pesticide-induced stress in arthropod pests for optimized integrated pest management programs. *Annual Review of Entomology* 61: 43-62. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023646>
- Da-Silva PR, Istchuk AN, Foresti J, Hunt TE, de Araújo TA, Fernandes FL, Bastos CS (2021) Economic injury levels and economic thresholds for *Diceraeus (Dichelops) melacanthus* (Hemiptera: Pentatomidae) in vegetative maize. *Crop Protection* 143: 105476. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105476>
- Han W, Zhang S, Shen F, Liu M, Ren C, Gao X (2012) Residual toxicity and sublethal effects of chlorantraniliprole on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Pest Management Science* 68: 1184-1190. <https://doi.org/10.1002/ps.3282>
- Harshman LG, Song KD, Casas J, Schuurmans A, Kuwano E, Kachman SD, Riddiford LM, Hammock BD (2010) Bioassays of compounds with potential juvenoid activity on *Drosophila melanogaster*: Juvenile hormone III, bisepoxide juvenile hormone III and methyl farnesoates. *Journal of Insect Physiology* 56: 1465-1470. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2010.06.003>
- IRAC (2019) IRAC Susceptibility test method 018. Insecticide Resistance Action Committee (IRAC). <https://irac-online.org/methods/plutella-xylostella-larvae/>. Fecha de consulta: 8 de marzo del 2019.
- Kang WJ, Koo HN, Jeong DH, Kim HK, Kim J, Kim GH (2017) Functional and genetic characteristics of chlorantraniliprole resistance in the diamondback moth, *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Entomological Research* 47: 394-403. <https://doi.org/10.1111/1748-5967.12258>
- Li Z, Feng X, Liu SS, You M, Furlong MJ (2016) Biology, ecology, and management of the diamondback moth in China. *Annual Review of Entomology* 61: 277-296. <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-010715-023622>
- Liu JL, Yang X, Zhang HM, Chen X, Wu JC (2013) Effects of indoxacarb on total protein, RNA, and DNA contents in the ovaries and fat bodies of *Nilaparvata lugens* Stål (Hemiptera: Delphacidae) adult females. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 106: 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.03.003>

- Mahmoudvand M, Abbasipour H, Garjan AS, Bandani AR (2011) Sublethal effects of indoxacarb on the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Applied Entomology and Zoology* 46: 75-80. <https://doi.org/10.1007/s13355-010-0010-1>
- Marak RM, Firake DM, Sontakke PP, Behere GT (2017) Mode of inheritance of Indoxacarb resistance in diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) and cross resistance to different groups of pesticides. *Phytoparasitica* 45: 549-558. <https://doi.org/10.1007/s12600-017-0618-6>
- Mota-Sanchez D, Wise JC (2023) The arthropod pesticide resistance database. Michigan State University. <http://www.pesticideresistance.org>. Fecha de consulta: 17 de agosto del 2023.
- Moustafa MA, Fouad EA, Ibrahim E, Erdei AL, Kárpáti Z, Fónagy A (2023) The Comparative Toxicity, Biochemical and Physiological Impacts of Chlorantraniliprole and Indoxacarb on *Mamestra brassicae* (Lepidoptera: Noctuidae). *Toxics* 11(3): 212. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114400>
- Nehare S, Moharil MP, Ghodki BS, Lande GK, Bisane KD, Thakare AS, Barkhade UP (2010) Biochemical analysis and synergistic suppression of indoxacarb resistance in *Plutella xylostella* L. *Journal of Asia-Pacific Entomology* 13: 91-95. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2009.12.002>
- Pu X, Yang Y, Wu S, Wu Y (2010) Characterisation of abamectin resistance in a field-evolved multiresistant population of *Plutella xylostella*. *Pest Management Science: Formerly Pesticide Science* 66: 371-378. <https://doi.org/10.1002/ps.1885>
- Quan LF, Zhang HJ, Sun L, Li YY, Yan WT, Yue Q, Qiu GS (2016) Research advances in sublethal effect of pesticide. *Journal Agriculture* 6: 33-38.
- R Core Team (2023) R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/> Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2023.
- Rehan A, Freed S (2015) Fitness cost of methoxyfenozide and the effects of its sublethal doses on development, reproduction, and survival of *Spodoptera litura* (Fabricius) (Lepidoptera: Noctuidae). *Neotropical entomology* 44: 513-520. <https://doi.org/10.1007/s13744-015-0306-5>
- Richard DS, Gilbert M, Crum B, Hollinshead DM, Schelble S, Scheswohl D (2001) Yolk protein endocytosis by oocytes in *Drosophila melanogaster*: immunofluorescent localization of clathrin, adaptin and the yolk protein receptor. *Journal of Insect Physiology* 47(7): 715-723. [https://doi.org/10.1016/S0022-1910\(00\)00165-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1910(00)00165-7)
- Rodríguez-Rodríguez JF, Cerna-Chávez E, Ochoa-Fuentes YM, Beltrán-Beache M, Landeros-Flores J, Guevara-Acevedo LP (2020) Efectos subletales en el desarrollo de *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) asociados a la resistencia a fipronil. *Acta zoológica mexicana* 36: 1-10. <https://doi.org/10.21829/azm.2020.3612214>
- Rodríguez-Rodríguez JF, Cerna-Chávez E, Ochoa-Fuentes YM, Landeros-Flores J, Guevara-Acevedo LP, Cisneros-López, HC (2021) Efectos subletales y costos de la resistencia a la abamectina en la polilla del lomo de diamante (*Plutella xylostella*) (Lepidoptera: Plutellidae). *Revista Colombiana de Entomología* 47(2): 1-7. <https://doi.org/10.25100/socolen.v47i2.10657>
- Sardar SW, Choi JY, Jo YJ, Ishag AESA, Kim MW, Ham HJ (2023) Residues and Safety Assessment of Cyantraniliprole and Indoxacarb in Wild Garlic (*Allium vineale*). *Toxics* 11(3), 219. <https://doi.org/10.3390/toxics11030219>
- SAS (2016) Base SAS®9.4 Procedures guide: High-performance procedures. Sixth edition. SAS Institute Inc. Statistical Analysis System. Cary, NC, USA. 170p.
- Shen JL, Tan JG, Xiao B, Tan FJ, You ZP (1991) Monitoring and forecasting of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) resistance to pyrethroid pesticides in China. *Chinese Journal of Applied Entomology* 28: 337-341.
- Song L, Zhang J (2013) Sublethal effects of indoxacarb and beta-cypermethrin on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae). *Acta Entomologica Sinica* 56: 521-529.
- Sugumaran M (2010) Chemistry of cuticular sclerotization. In: *Advances in insect Physiology Book series*. 39: 151-209. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-381387-9.00005-1>
- Tufail M, Takeda M (2008) Molecular characteristics of insect vitellogenins. *Journal of Insect Physiology* 54: 1447-1458. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2008.08.007>
- Verhoeven KJ, Macel M, Wolfe L M, Biere A (2011) Population admixture, biological invasions and the balance between local adaptation and inbreeding depression. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 278: 2-8. <https://doi.org/10.1098/rspb.2010.1272>
- Vojoudi S, Saber M, Gharekhani G, Esfandiari E (2017) Toxicity and sublethal effects of hexaflumuron and indoxacarb on the biological and biochemical parameters of *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae) in Iran. *Crop Protection* 91: 100-107. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2016.09.020>

- Wang G, Huang X, Wei H, Fadamiro HY (2011) Sublethal effects of larval exposure to indoxacarb on reproductive activities of the diamondback moth, *Plutella xylostella* (L.) (Lepidoptera: Plutellidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology* 101: 227-231. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2011.09.010>
- Wang XL, Su W, Zhang JH, Yang YH, Dong K, Wu YD (2016) Two novel sodium channel mutations associated with resistance to indoxacarb and metaflumizone in the diamondback moth, *Plutella xylostella*. *Insect Science* 23: 50-58. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12226>
- Wang W, Su Y, Liu X, Qi R, Li F, Li B, Sun H (2023a) Low concentration of indoxacarb interferes with the growth and development of silkworm by damaging the structure of midgut cells. *Pesticide Biochemistry and Physiology* 195: 105567. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2023.105567>
- Wang ZJ, Wang NM, Yu QT, Xue CB (2023b). Sublethal effects of an indoxacarb enantiomer insecticide on *Plutella xylostella* caterpillar and *Chrysoperla sinica* predator. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 249: 114400. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114400>
- Wing KD, Andaloro JT, McCann SF, Salgado VL (2010) Indoxacarb and the sodium channel blocker insecticides: chemistry, physiology and biology in insects. In: Lawrence IG, Sarjeet SG (ed) *Insect control biological and synthetic agents*. El Silver. In Tech. China. pp: 35-57. <https://doi.org/10.1016/B0-44-451924-6/00070-3>
- Yin C, Wang R, Lu, C, Zhao K, Wu Q, Wang Z, Yang G (2019) Monitoring, cross-resistance, inheritance, and synergism of *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to pyridalyl in China. *Journal of Economic Entomology* 112: 329-334. <https://doi.org/10.1093/jee/toy334>
- Yin XH, Wu QJ, Li XF, Zhang YJ, Xu BY (2008) Sublethal effects of spinosad on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Yponomeutidae). *Crop Protection* 27: 1385-1391. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2008.05.008>
- Zhang CX, Wang ZJ, Li JJ, Wang NM, Xue CB (2022) Sublethal effects of tolfenpyrad on the development, reproduction, and predatory ability of *Chrysoperla sinica*. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 236: 113482. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113482>
- Zhao JZ, Li YX, Collins HL, Gusukuma-Minuto L, Mau RFL, Thompson GD, Shelton AM (2002) Monitoring and characterization of diamondback moth (Lepidoptera: Plutellidae) resistance to spinosad. *Journal of Economic Entomology* 95: 430-436. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-95.2.430>