

## EVALUACIÓN DEL RIESGO A LA SALUD POR LA EXPOSICIÓN A PLAGUICIDAS A TRAVÉS DEL CONSUMO DE TOMATE (*Solanum lycopersicum* L.), EN GUASAVE, SINALOA, MÉXICO

Health risk assessment from pesticide exposure through tomato (*Solanum lycopersicum* L.) consumption in Guasave, Sinaloa, Mexico

José Belisario LEYVA-MORALES<sup>1,2\*</sup>, Pedro de Jesús BASTIDAS-BASTIDAS<sup>3</sup>,  
Brian Arturo RODRÍGUEZ-AGUILAR<sup>4</sup>, Yasser A. DAVIZON<sup>5</sup>, Henri MÁRQUEZ-PACHECO<sup>6</sup>,  
Jesús Mateo AMILLANO-CISNEROS<sup>7</sup>, Daniel Enrique GODÍNEZ-SIORDIA<sup>8</sup>,  
Rogelia Guillermina LORENTE ADAME<sup>9</sup>, Luis-Carlos GONZÁLEZ-MÁRQUEZ<sup>10</sup>,  
Lucía LEYVA CAMACHO<sup>11</sup> y Vilma del Carmen SALVATIERRA-STAMP<sup>12\*\*</sup>

<sup>1</sup> Área Académica de Química, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH), km 4.5 carretera Pachuca-Tulancingo, 42184 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Recursos Naturales y Sustentabilidad (CIRENYS), Universidad Bernardo O'Higgins, Av. Viel 1497, 8370993 Santiago, Chile.

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C. (CIAD), Campo el Diez, km 5.5 carretera a Eldorado, 80393 Culiacán, Sinaloa, México.

<sup>4</sup> Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, 22860 Ensenada, Baja California, México.

<sup>5</sup> Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Los Mochis, Juan de Dios Bátiz y 20 de Noviembre, 81259 Los Mochis, Sinaloa, México.

<sup>6</sup> Ingeniería Agroindustrial, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS), km 3 carretera a Potrerillos del Noroeste, La Cruz, 82700 Elota, Sinaloa, México.

<sup>7</sup> Ingeniería en Agrotecnología, Universidad Politécnica del Mar y la Sierra (UPMYS), km 3 carretera a Potrerillos del Noroeste, La Cruz, 82700 Elota, Sinaloa, México.

<sup>8</sup> Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras, Universidad de Guadalajara, Gómez Farías 82, San Patricio, 48980 Melaque, Jalisco, México.

<sup>9</sup> Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Universidad de Guadalajara, Av. Independencia Nacional 151, 48900 Axtlán, Jalisco, México.

<sup>10</sup> Departamento de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO), Av. Universidad s/n, Fraccionamiento Villa Universidad, 81048 Guasave, Sinaloa, México.

<sup>11</sup> Departamento de Salud, Universidad Autónoma de Occidente (UAdeO), Av. Universidad s/n, Fraccionamiento Villa Universidad, 81048 Guasave, Sinaloa, México.

<sup>12</sup> Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Colima, km 9 carretera Colima-Coquimatlán, 28400 Coquimatlán, Colima, México.

Autores para correspondencia: \*neo1702@gmail.com; \*\*vsalvatierra@ucol.mx

(Recibido: octubre de 2023; aceptado: marzo de 2024)

Palabras clave: noroeste mexicano, seguridad alimentaria, productos agrícolas, cociente de riesgo, límite máximo de residuo.

### RESUMEN

El municipio de Guasave, Sinaloa, México, destaca por ser uno de los principales productores agrícolas a nivel nacional. Dentro de los productos cultivados sobresale el tomate, una hortaliza muy sensible al ataque de plagas, por lo que durante el establecimiento del cultivo se requiere el uso constante de plaguicidas químicos; éstos dejan

residuos en el producto final que pueden representar un riesgo para el consumidor. En el presente estudio se monitoreó la presencia de residuos de plaguicidas en muestras de tomate producido localmente. Los plaguicidas se extrajeron mediante el método “rápido, fácil, barato, efectivo, resistente y seguro” (QuEChERS, por su sigla en inglés) y cuantificados mediante cromatografía de gases acoplada a los detectores de microcaptura de electrones y fotométrico de flama pulsada. Una vez conocida la concentración de analitos, se calculó la ingesta diaria estimada, la cual fue comparada con la ingesta diaria admisible para calcular el cociente de riesgo. Este último se estimó en dos escenarios, el general (concentración promedio) y el peor (concentración máxima). Los riesgos se estimaron tanto para niños como para adultos. Los resultados mostraron la presencia en los tomates de los plaguicidas metanidofos, lambda cialotrina, *p,p'*-DDE y malatióen concentraciones superiores al límite de cuantificación, aunque únicamente el malatióen representó un riesgo aparente para la salud de los niños en los dos escenarios evaluados. Sin embargo, al considerar el efecto acumulativo de todos los plaguicidas encontrados, los adultos también podrían estar en riesgo por el consumo de esta hortaliza. Por ello, en México es recomendable la vigilancia exhaustiva de los residuos de plaguicidas en los productos agrícolas de consumo humano.

Key words: northwestern Mexican, food safety, agricultural products, risk quotient, maximum residue limit.

## ABSTRACT

The municipality of Guasave, Sinaloa, Mexico, stands out for being one of the main agricultural producers at the national level. Among the cultivated products stands out the tomato, which is very susceptible to pest attack. So, during the establishment of the crop, the constant use of chemical pesticides is required, which leaves residues in the final product that can represent a risk for the consumer. In the present study, the presence of pesticide residues in samples of locally produced tomatoes was monitored; pesticides were extracted by the “quick, easy, cheap, effective, rugged, and safe” (QuEChERS) method and quantified by gas chromatography coupled to micro electron capture and pulsed flame photometric detectors. Once the analyte concentration was known, the estimated daily intake was calculated and compared with the acceptable daily intake to calculate the risk quotient. The latter was estimated in the overall (average concentration) and the worst-case (maximum concentration) scenarios. Risks were estimated for both children and adults. The results showed the presence of the pesticides methanidophos, lambda-cyhalothrin, *p,p'*-DDE, and malathion in the tomatoes in concentrations above the limit of quantification. However, only malathion posed an apparent health risk to children in the two scenarios evaluated. However, considering the cumulative effect of all the pesticides found, adults could also be at risk from the consumption of this vegetable. Therefore, comprehensive monitoring of pesticide residues in agricultural products for human consumption is recommended in Mexico.

## INTRODUCCIÓN

El uso de plaguicidas en la agricultura es fundamental para satisfacer las necesidades de alimentos a nivel mundial. Sin embargo, el abuso en el uso de estos compuestos, ya sea porque se aplican dosis elevadas o por un incorrecto periodo de carencia (tiempo que debe transcurrir entre la última aplicación de un producto fitosanitario en un cultivo dado y el momento de la cosecha), ocasiona que los alimentos cultivados

contengan sus residuos (Schleiff y Speiser 2022). Debido a su naturaleza, tienden a ser compuestos tóxicos que, en exposiciones a altas concentraciones en periodos de tiempo cortos (exposición aguda) o en bajas concentraciones y exposiciones prolongadas (exposición crónica), pueden ocasionar consecuencias negativas tanto en el ambiente como en la salud de los consumidores (Kim et al. 2017, Hlihor et al. 2019, Lee y Choi 2020, Kalyabina et al. 2021). En este sentido, a nivel internacional y nacional existen

normativas establecidas por autoridades sanitarias en las cuales se establecen las concentraciones que pueden estar presentes en los alimentos sin generar daño a los consumidores; dichas restricciones son denominadas límites máximos de residuos de plaguicidas (COFEPRIS 2016).

*Solanum lycopersicum* L., conocida comúnmente como tomate rojo o jitomate, es una de las hortalizas más importantes para el consumo humano a nivel internacional y nacional (Álvarez-Medina et al. 2017); posee un elevado valor nutritivo, ya que es una fuente de minerales como calcio, fósforo, potasio y sodio, vitaminas A, B1, B2 y C, así como de antioxidantes y carotenoides, principalmente licopeno. Se le atribuyen propiedades antisépticas, alcalinizantes, depurativas, diuréticas, digestivas, laxantes, antiinflamatorias y remineralizantes (Berrospe-Ochoa et al. 2018, Salehi et al. 2019). Por lo tanto, su comercialización genera una importante fuente de empleo y cuantiosos ingresos económicos (Orona-Castillo et al. 2022; Maldonado-Peralta et al. 2023).

De acuerdo con el Boletín mensual de avance de la producción de tomate rojo ( jitomate) (SIAP 2022) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, que considera el escenario mensual de productos agroalimentarios, en México se produjeron 888 412 toneladas de esta hortaliza en 2021 y se pronosticó una producción de 1 562 558 t para 2022, siendo Sinaloa el estado con mayor producción nacional, con una aportación del 62.2 %. En este sentido, con la finalidad de lograr una agricultura competitiva que satisfaga los requerimientos de los consumidores, el producto se protege de diversos agentes externos como el clima, las plagas y las enfermedades, lo que obliga a los agricultores a emplear tecnologías especializadas, plaguicidas y/o cultivo en invernaderos (Arias et al. 2021).

De acuerdo con Pérez-Olvera et al. (2011), el tomate se encuentra dentro de los seis principales productos agrícolas cultivados en México, con una superficie agrícola sembrada anualmente de alrededor de las 53 000 ha concentradas principalmente en los estados de Baja California, Michoacán, Sinaloa, Veracruz y Zacatecas. Sin embargo, por ser una hortaliza muy sensible al ataque de plagas, presenta una alta dependencia al uso de plaguicidas para su control, sobre todo a los de origen químico. Esto implica la presencia de residuos de plaguicidas en el producto final (Martins Moura et al. 2020, Arias et al. 2021, Hatamleh et al. 2022, Tripathy et al. 2022, Wondimu y Geletu 2023), por lo cual la probabilidad de encontrar residuos de estos compuestos orgánicos es alta cuando se realiza un monitoreo de este alimento. Si no se tienen buenas prácticas de uso y manejo de

plaguicidas (BUMA) se puede inclusive rebasar los límites máximos de residuos de plaguicidas (LMRs) establecidos tanto a nivel nacional como internacional (COFEPRIS 2016).

El consumo de alimentos con residuos de plaguicidas puede tener efectos negativos en la salud (Mnif et al. 2011, Kim et al. 2017, Elgueta et al. 2021, Calderón et al. 2022, Ssemugabo et al. 2022). La exposición a través de la ingesta a largo plazo se ha asociado con alteraciones neurológicas, disrupción endocrina, daño reproductivo y algunos tipos de cáncer (Weinberg 2009, WHO 2012).

Debido a que el tomate es la hortaliza que más se cultiva en México, a su gran valor económico y a que la demanda mundial ha registrado un aumento exponencial tanto para consumo directo como materia prima para la producción de diversos alimentos procesados (SAGARPA 2016), existe un creciente interés de la comunidad científica por determinar la concentración de residuos de plaguicidas en este alimento y estudiar sus efectos potenciales sobre la salud humana mediante estadísticas completas y datos confiables en diversas poblaciones (Martínez-Bueno et al. 2022, Craveiro de Andrade et al. 2023, Singh et al. 2023). Sin embargo, aún hay poca información sobre los residuos de plaguicidas presentes en alimentos, independientemente del origen (vegetal o animal), y los estudios de monitoreo son muy escasos en México (García-Hernández et al. 2018). En el presente estudio se evaluó la concentración de plaguicidas en tomate (*Solanum lycopersicum* L.) y se estimó el riesgo a la salud humana debido a su consumo en Guasave, Sinaloa, México

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio y muestreo

En Guasave la actividad económica primaria corresponde a la agricultura, principalmente de tipo tecnificado. La superficie dedicada actualmente a esta actividad es de aproximadamente 181 542 ha y se caracteriza por ubicarse en los primeros lugares de producción de granos y hortalizas a nivel nacional. El estado de Sinaloa es comúnmente conocido como el corazón agrícola de México. Su agricultura usa una amplia variedad de plaguicidas como práctica común con el fin de alcanzar sus objetivos en la producción (Leyva-Morales et al. 2014). En este sentido, los residuos de estos compuestos químicos representan un riesgo tanto para el ambiente como para la salud de los consumidores de productos posiblemente contaminados, razón por la cual se escogió este sitio como zona de estudio (González-Márquez et

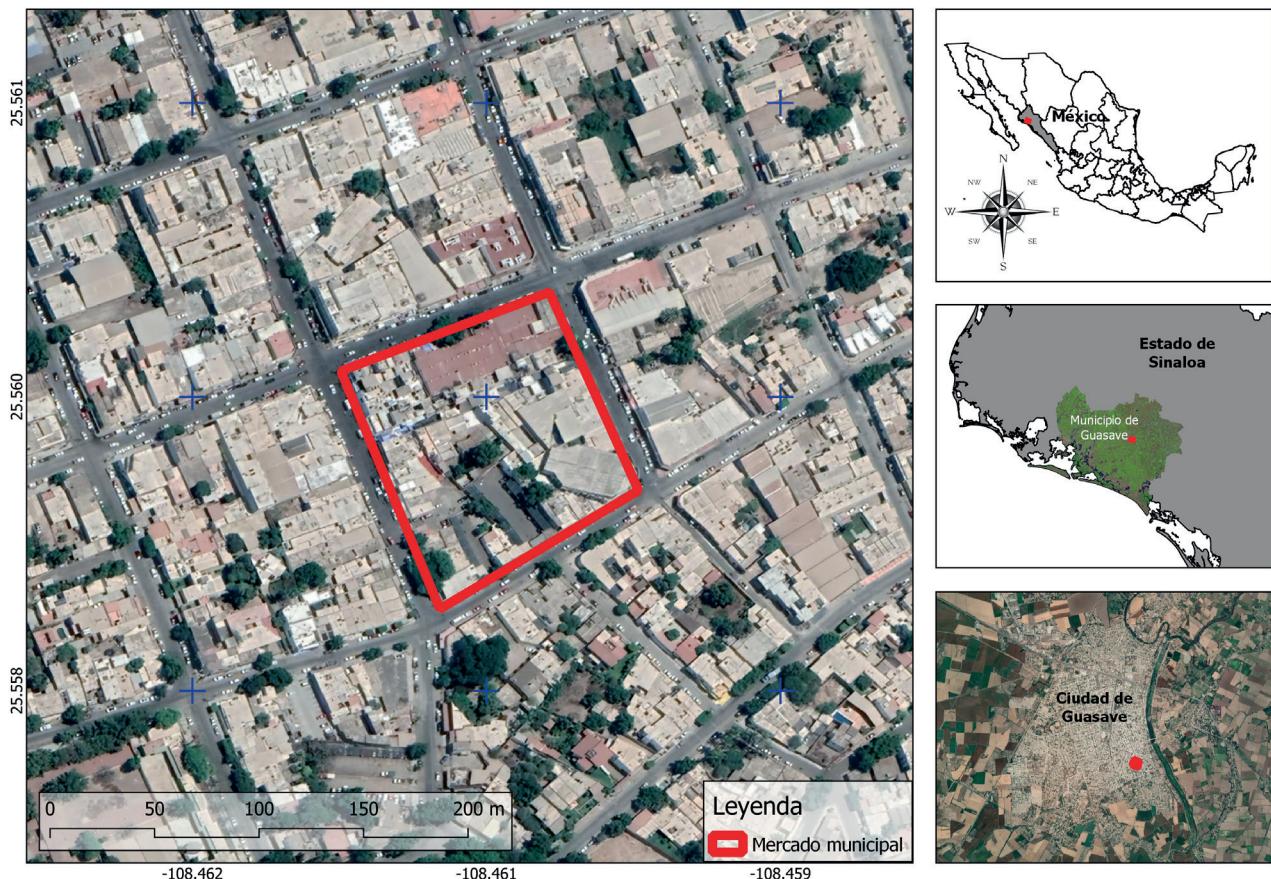


Fig. 1. Ubicación del mercado municipal en Guasave, Sinaloa, México.

al. 2021, López-Gaxiola et al. 2021). Las muestras de tomate ( $n = 18$ ) fueron adquiridas en mayo de 2020 en el mercado local de la ciudad de Guasave (Fig. 1), surtidas por productores locales, mismas que se integraron por unidades seleccionadas de manera aleatoria en cada uno de los puestos ( $n = 18$ , recolectando la misma cantidad de producto) hasta completar un peso promedio de 3.5 kg, siguiendo las indicaciones del Codex Alimentarius (al menos 10 unidades de 25 a 250 g hasta completar un peso de 3 a 6 kg) (CAC 2016).

### Preparación de la muestra

La muestra de tomate se preparó conforme a las indicaciones del Manual analítico de plaguicidas de la Administración de Drogas y Medicamentos de EUA, específicamente del apartado 102-A referente a la preparación de muestras para el análisis de plaguicidas. En este caso, la parte comestible se licuó y homogeneizó en una licuadora industrial, de donde se tomó una porción de 100 g como muestra representativa para el análisis (FDA 1999).

### Determinación de los plaguicidas en las muestras de tomate mediante el método “rápido, fácil, barato, efectivo, resistente y seguro” (QuEChERS) Extracción y partición

Se colocaron  $15 \pm 0.1$  g de la muestra previamente homogenizada en un tubo de centrífuga de 50 mL. Luego se adicionaron 15 mL de acetonitrilo acidificado al 1 % con ácido acético y se sometió a baño ultrasónico por 10 min; se agregaron 6.0 g de sulfato de magnesio más 1.5 g de acetato de sodio, se mezclaron durante 1 min en vórtex y se centrifugaron a 4000 RPM por 5 min (Bastidas-Bastidas et al. 2019).

### Limpieza mediante dispersión en fase sólida

Después se tomaron 8 mL del sobrenadante y se colocaron en un tubo de centrífuga con 50 mg de amina primaria/secundaria (PSA) y 150 mg de sulfato de magnesio anhidro por cada mililitro del sobrenadante, que posteriormente se agitó empleando el vórtex durante 1 min y luego se centrifugó a 4000 RPM por 5 min (Bastidas-Bastidas et al. 2019).

### Reconcentración

Posteriormente se tomaron 4 mL del sobrante, se colocaron en un matraz bola de 50 mL y se reconcentraron en un rotaevaporador a 40 °C hasta evaporación total. A continuación se reconstituyó el extracto agregando 1.0 mL con acetona, quedando listo para la determinación de los plaguicidas, la cual se hizo mediante cromatografía de gases con detectores de microcaptura de electrones y fotométrico de flama pulsada (FDA 1999, Bastidas-Bastidas et al. 2014, 2019).

### Identificación y cuantificación de plaguicidas

Para analizar los residuos de plaguicidas halogenados y organofosforados se utilizó un cromatógrafo de gases Agilent 7890B acoplado a los detectores anteriormente mencionados. Los estándares analíticos y las muestras fueron inyectados de forma automática a través del automuestreador 7693 de Agilent a puertos de inyección *split/splitless* con columna capilar marca Agilent DB-17 Pesticides (50 % fenilo + 50 % metilpolisiloxano), de 30 × 0.25 mm D.I. × 0.25 µm de película. La rampa de temperatura fue programada para mantenerse a temperatura inicial de 100 °C durante 2 min, para aumentar a 170 °C a una tasa de 20 °C/min que se mantuvo por 1.25 min. Finalmente se llevó a 275 °C a una tasa de 4 °C/min, manteniéndolo por 12 min. Las temperaturas del inyector y del detector fueron de 250 y 300 °C, respectivamente. El modo de inyección fue *split/splitless*, con tasa de 10:1 y volumen de inyección de 1 µL. El tiempo total para cada corrida fue de 45 min. El gas acarreador fue nitrógeno a un flujo de 1.5 mL/min. La cuantificación se realizó utilizando como estándar interno el trifenilfosfato (Bastidas-Bastidas et al. 2019). Los analitos medidos por cromatografía de gases con detector de microcaptura de electrones (GC-µECD) fueron los del grupo de los halogenados: aldrín, bifentrina, boscalid, captán, ciflutrina, cipermetrina, ciprodinil, clorfenapir, clorotalonil, deltametrina, endosulfán (alfa, beta y sulfato), fipronil, fludioxonil, heptacloro, lambda cialotrina, metoxicloro, miclobutanil, permetrina (cis y trans), pirimetanil, piriproxifen, *p,p'*-dclorodifenildicloroetileno (DDE), pentacloroanilina (PCA), pentacloronitrobenceno (PCNB), procimidona, spiromesifen, y trifloxistrobina; mientras que por cromatografía de gases con detector fotométrico de flama pulsada (CG-FPD) se midieron los del grupo de los organofosforados: acefate, azinfos metílico, clorpirifos, diclorvos, dimetoato, diazinón, metamidofos, malatión y paratión metílico.

Todos los estándares utilizados fueron de la marca Chem Service con pureza superior al 98 %; en el

caso de los halogenados la concentración empleada para la cuantificación fue de 0.1 ng/µL y en el de los organofosforados fue de 0.5 ng/µL.

### Control de calidad del método

Junto con el set de muestras procesado se analizó por triplicado, como control de calidad, una muestra fortificada (1 ppm) con la mezcla de los compuestos a analizar, a fin de demostrar el buen funcionamiento del método (Leyva-Morales et al. 2019). Los porcentajes de recuperación de los analitos estuvieron entre 82.48 y 101.06 % para heptacloro y malatión, respectivamente, y se observó un coeficiente de variación en el rango de 2.68 y 13.24 % para cipermetrina y azinfos metílico, respectivamente. Los resultados obtenidos cumplen con los criterios establecidos en la guía EURACHEM (Magnusson y Örnemark 2014), confirmando que el método empleado fue exacto y preciso en el rango analítico propuesto. Por otro lado, los límites de detección se establecieron entre 0.001 y 0.010 mg/kg y los límites de cuantificación entre 0.003 y 0.030 mg/kg; se observó un comportamiento lineal ( $R^2 > 0.99$ ) para todos los analitos (véase el Cuadro CI en el material complementario).

### Evaluación de los riesgos asociados a la salud humana

Para la evaluación del riesgo asociado se tomaron en consideración la ingesta diaria estimada (IDE) y la ingesta diaria aceptable (IDA) para cada plaguicida, obtenida de la base de datos de las propiedades de los plaguicidas mediante el cálculo del cociente de riesgo (EFSA 2013, Calderón et al. 2022, UH 2022). La IDE se obtuvo multiplicando la concentración promedio de cada plaguicida encontrado en las muestras (en mg/kg) por la tasa de consumo de tomate (EFSA 2007) (que, de acuerdo con lo reportado en la Guía de Alimentos para la Población Mexicana es de 0.124 kg/día; Pérez-Lizaur et al. 2014) y el peso corporal promedio para un mexicano adulto (75 kg; Rodríguez-Martínez et al. 2020). El cociente de riesgo (CR) se obtuvo mediante la división de la IDE (mg/kg/día) entre su correspondiente IDA. Para el caso de niños se consideró un peso promedio de 10 kg y una tasa de consumo equivalente a un cuarto de lo reportado para un adulto (Calderón et al. 2022).

Tanto para niños como para adultos se plantearon dos escenarios: uno general, considerando la concentración promedio de cada plaguicida y otro, el peor, tomando en cuenta la concentración máxima. Además, se efectuó la sumatoria de los CR individuales de cada plaguicida para estimar el riesgo global de la exposición a múltiples plaguicidas. Si el CR, tanto

individual como en la sumatoria total, es mayor que la unidad, existe un riesgo (Calderón et al. 2022).

### Análisis estadístico

Con los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico descriptivo mediante medidas de tendencia central y de dispersión, cuando se trató de variables manejadas en forma continua, y como porcentajes, cuando se trató de variables manejadas en forma categórica. Para comprobar la linealidad del método se realizó un análisis de regresión lineal con lo cual se estableció el coeficiente de determinación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Detección y cuantificación de plaguicidas

De las 18 muestras analizadas, en seis no se encontró ningún plaguicida mientras que en las demás (66.67 %) se identificaron 19 plaguicidas de los 36 analizados (Fig. 2). De éstos, 15 presentaron concentraciones menores al límite de detección (véase el Cuadro CI en el material complementario), mientras que metamidofos, lambda cialotrina, *p,p'*-DDE, y malatión se encontraron en concentraciones superiores a sus límites de cuantificación (se obtuvieron valores de concentración promedio y máximo; Cuadro I). En el cuadro I se puede observar que estos cuatro plaguicidas tuvieron concentraciones superiores al

LMR de la Unión Europea, y que, a excepción del malatión, todos están prohibidos de acuerdo con el Codex Alimentarius (CAC 2016). También se puede observar que la concentración máxima de malatión es casi el doble del LMR permitido para México y Estados Unidos, que es donde se admite la mayor concentración permitida (concentración máxima encontrada en las muestras = 15.20 mg/kg vs. LMR para México y Estados Unidos = 8.00 mg/kg).

Como se comentó anteriormente, 15 plaguicidas tuvieron concentraciones por debajo de su límite de detección; sin embargo, algunos de ellos están prohibidos en México, Canadá o Estados Unidos (ciprodinil, fludioxonil, boscalid, paratión metílico, metoxicloro y procimidona); por lo tanto, no deberían emplearse, como es el caso del paratón metílico (organofosforado) y metoxicloro (organoclorado), que son altamente tóxicos y persistentes; o como ciprodinil y fludioxonil (usualmente aplicados como mezcla), que son moderadamente persistentes, ya que tienen un tiempo de vida media en suelo de aproximadamente 30 días, aunque en agua se descomponen moderadamente rápido (entre 2 y 12 días), por lo que no deberían detectarse (Lewis et al. 2016).

Aunque los plaguicidas que presentaron mayor concentración fueron metamidofos, lambda cialotrina, *p,p'*-DDE y malatión, se pudo observar la presencia de residuos de miclobutanol, spiromesifen, bifentrina, piriproxifen, boscalid, fludioxonil y

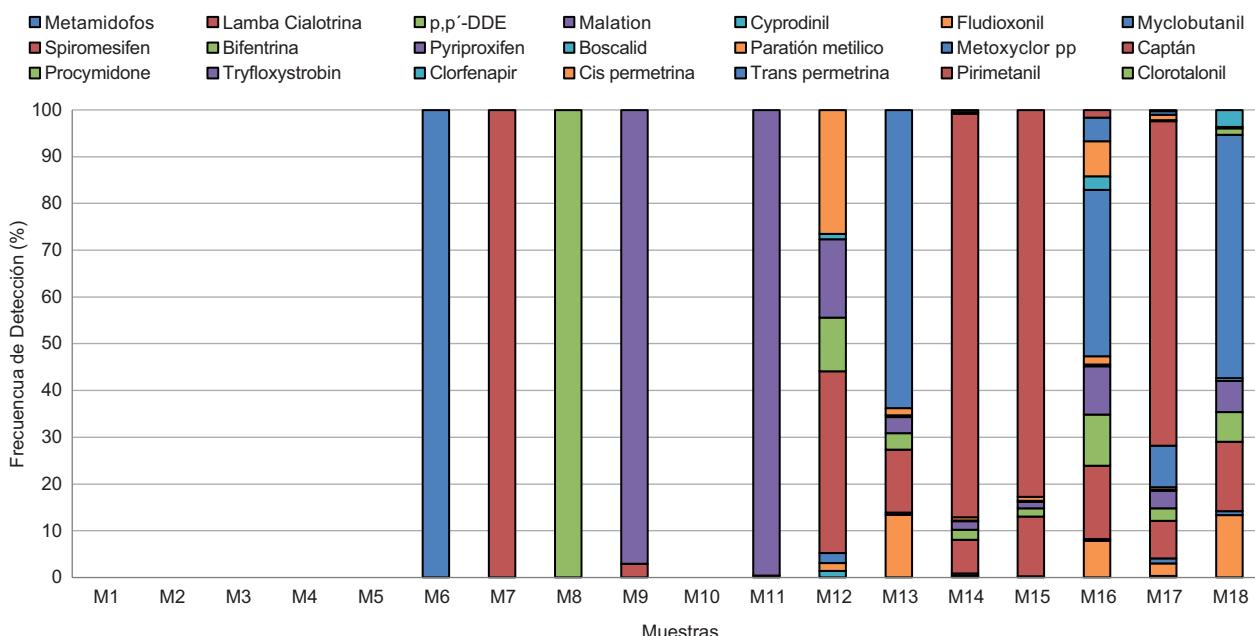


Fig. 2. Porcentaje de contribución de los plaguicidas presentes en muestras (M) de tomate en Guasave, Sinaloa, México.

**CUADRO I. CONCENTRACIONES DE PLAGUICIDAS DETECTADAS EN TOMATE EN GUASAVE, SINALOA, MÉXICO, Y SU COMPARACIÓN CON LÍMITES MÁXIMOS DE RESIDUOS (LMRS) EN JAPÓN, MÉXICO, EL CÓDEX ALIMENTARIUS, LA UNIÓN EUROPEA, CANADÁ Y ESTADOS UNIDOS.**

Plaguicidas	Concentración promedio ± desviación estándar (mg/kg)	Concentración máxima máxima (mg/kg)	Concentración (ppm)				
			Japón <sup>a</sup>	Méjico <sup>b</sup>	Codex Alimentarius <sup>c</sup>	Unión Europea <sup>d</sup>	Canadá <sup>e</sup>
Metamidofos	0.12*	0.12	<b>0.02</b>	1.00	Prohibido	<b>0.01</b>	0.5
Lambda cialotrina	0.24 ± 0.20	0.38	0.50	<b>0.10</b>	Prohibido	<b>0.07</b>	<b>0.10</b>
<i>pp</i> -DDE	0.07 ± 0.01	0.08	0.20	Prohibido	Prohibido	<b>0.05</b>	<b>0.05</b>
Malatión	13.89 ± 1.85	15.20	<b>0.50</b>	<b>8.00</b>	<b>0.50</b>	<b>0.02</b>	<b>8.00</b>
Ciprodinil	< LD	—	0.50	Prohibido	Prohibido	<b>3.0</b>	—
Fludioxonil	< LD	—	5.00	Prohibido	3.00	3.00	1.50
Miclobutanil	< LD	—	2.00	0.30	0.30	0.60	5.00
Espionomesifen	< LD	—	3.00	0.30	0.30	0.30	0.30
Bifentrina	< LD	—	0.50	0.15	0.30	0.30	0.50
Piriproxifeno	< LD	—	1.00	0.20	0.40	0.70	0.25
Boscalid	< LD	—	5.00	1.20	Prohibido	3.00	1.40
Paratón metilo	< LD	—	0.20	1.00	Prohibido	0.01	Prohibido
Metoxicloro	< LD	—	7.00	Prohibido	Prohibido	0.01	Prohibido
Captán	< LD	—	5.00	25.00	5.00	1.00	5.00
Procimidona	< LD	—	4.00	Prohibido	Prohibido	0.01	Prohibido
Trifloxistrobina	< LD	—	0.70	0.50	0.70	0.70	0.50
Clorfenapir	< LD	—	1.00	1.00	0.40	0.01	2.00
Permetrina	< LD	—	4.00	2.00	1.00	0.05	2.00
Primetanil	< LD	—	2.00	0.50	0.70	1.00	0.50

\*Dato único (medido en una sola muestra).

LD: límite de detección; DDE: diclorodifenildicloroetileno.

<sup>a</sup>https://jpn-pesticides-database.jp/prdb/en/index\_en.pl; <sup>b</sup>http://suiris03.cofepris.gob.mx/Resoluciones/Consultas/ConWebRegPlaguicida.asp; <sup>c</sup>https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/pestres/pesticidas/en/; <sup>d</sup>https://ec.europa.eu/food/plant/pesticides/eu-pesticidas-database/start/screen/mrls; <sup>e</sup>https://pest-control.canada.ca/pesticide-registry/en/mrl-search.html; <sup>f</sup>https://www.globalmrl.com/

Nota: las cifras en negritas indican que la concentración promedio del residuo rebasa los límites máximos establecidos.

paración metílico en más del 38 % de las muestras analizadas, lo que evidencia que se siguen usando en los procesos agrícolas para el control de plagas en el estado de Sinaloa. La presencia de *p,p'*-DDE puede ser el resultado del uso histórico del diclorodifeniltricloroetano (DDT) en diversos cultivos de la región, ya que es el último producto de degradación de este plaguicida, cuya persistencia es mayor a 30 años (Leyva-Morales et al. 2017). De hecho, recientemente se ha reportado su presencia en suelos de valles agrícolas de la zona, por lo que su identificación en las muestras analizadas pudiera ser el resultado de la transferencia entre matrices (García-Hernández et al. 2021).

En México, de acuerdo con las investigaciones realizadas por Rodríguez-Martínez et al. (2020) en Oaxaca y Díaz-Vallejo et al. (2021) en Veracruz, tanto el metamidofos como la lambda cialotrina se han estado usando en el cultivo de tomate, a pesar de ser plaguicidas prohibidos por el Codex Alimentarius (CAC 2016), lo cual podría deberse a la afectación que producen a nivel de los sistemas nervioso central y hematológico (Díaz-Vallejo et al. 2021). Por otro lado, El-Sheikh et al. (2023) investigaron la presencia de plaguicidas en productos de tomate en Egipto y encontraron que la lambda cialotrina es un insecticida ampliamente usado que se identificó en al menos el 60 % de las muestras analizadas de estos productos.

### Cumplimiento de la normatividad nacional e internacional

Aunque la diversidad de plaguicidas encontrados varió desde uno, en las muestras 6, 7 y 8, hasta 14 en la muestra 17, únicamente cuatro presentaron concentraciones superiores al límite de cuantificación. De los plaguicidas encontrados por arriba del límite de cuantificación, lambda cialotrina, *p,p'*-DDE y malatión se identificaron en el 11.11 % de las muestras, en tanto que metamidofos únicamente en el 5.56 %. El resto de los plaguicidas presentes en las muestras se hallaron en concentraciones por debajo de sus límites de detección (**Cuadro I**; **Fig. 2**). La concentración promedio de *p,p'*-DDE reportada fue de  $0.07 \pm 0.01$  mg/kg, con una concentración máxima de 0.08 mg/kg. De acuerdo con la normatividad internacional y nacional, el uso de este compuesto en tomate está prohibido en México, Canadá y los países donde se aplica la normativa del CAC. No obstante, las concentraciones encontradas fueron superiores a los LMR de Estados Unidos y la Unión Europea, aunque inferiores al de Japón. En el caso del malatión, aunque está permitido su uso en este producto agrícola, al compararlo con la normativa internacional

y nacional, se puede observar que tanto la concentración promedio ( $13.89 \pm 1.85$  mg/kg) como la máxima (15.20 mg/kg) se encuentran por arriba de los LMR permitidos (**Cuadro I**). En este mismo sentido, las concentraciones promedio ( $0.24 \pm 0.20$  mg/kg) y máxima (0.38 mg/kg) de lambda cialotrina violan lo establecido por el CAC (CAC 2016), que prohíbe el uso de este plaguicida, y son superiores a los LMR establecidos en México (0.10 mg/kg), la Unión Europea (0.07 mg/kg), Estados Unidos (0.10 mg/kg) y Canadá (0.20 mg/kg), encontrándose solamente en concentraciones menores al LMR permitido en Japón (0.50 mg/kg). Finalmente, metamidofos, que está prohibido en Estados Unidos y en la normativa establecida en el Codex Alimentarius, se encontró únicamente en la muestra 6 a una concentración de 0.12 mg/kg (**Cuadro I**; **Fig. 2**), superior a los LMR de Japón (0.02 mg/kg) y la Unión Europea (0.01 mg/kg), e inferior a lo establecido en México (1.00 mg/kg) y Canadá (0.50 mg/kg; **Cuadro I**).

Cabe mencionar que Pérez et al. (2013) indicaron que si bien en México la residualidad de plaguicidas en alimentos de origen vegetal está regulada, aún existen algunos productos autorizados en la producción agrícola que están prohibidos en otros países. Por esta razón, la presencia de este tipo de contaminantes en frutas y hortalizas es habitual, incluso a concentraciones superiores a los LMR, a pesar de que se producen con fines de exportación, lo que representa un posible riesgo a los consumidores mexicanos.

En un estudio realizado por Bastidas-Bastidas et al. (2014) en muestras de hortalizas (chile bell, chile picoso, pepino y tomate) producidas con fines de exportación en Sinaloa entre 2011 y 2013, el 70 % de las muestras presentaron residuos de plaguicidas dentro de los LMR permitidos y el 2 % los sobrepasó, de acuerdo con la normativa mexicana; el 16 % no presentaron residuos y finalmente el 12 % presentó residuos de plaguicidas prohibidos.

En este mismo sentido, Díaz-Vallejo et al. (2021) evaluaron el cumplimiento de los LMR de plaguicidas en alimentos (cereales, frutas, leguminosas, tubérculos y verduras) comercializados en el estado de Veracruz durante el periodo comprendido entre 2013 y 2018, encontrando que el 57.4 % de las muestras analizadas presentaron residuos de uno o más plaguicidas. El 14.8 % tuvieron concentraciones superiores a los LMR y el 14.3 % de las muestras presentó residuos de plaguicidas cuyo uso está prohibido en el alimento en que se encontraron, particularmente metamidofos, monocrotofos, triazofos y clorpirifos. Finalmente, al igual que en el presente estudio, se detectó la presencia

de más de un plaguicida por muestra (desde dos hasta 15). Finalmente, al igual que en el presente estudio, Díaz-Vallejo et al. (2021) detectaron múltiples residuos de plaguicidas (desde dos hasta 15 compuestos) por muestra. En el caso particular de las muestras de tomate (saladette y bola) analizadas (10.1 % del total de las muestras analizadas), el 6.7 % registró concentraciones superiores a los LMR; asimismo, el 26.7 % mostró la presencia de plaguicidas prohibidos (metamidofos, acefate, endosulfán y monocrotofos), siendo monocrotofos el que presentó una concentración superior (1.75 mg/kg) a los LMR establecidos en México, Estados Unidos y la Unión Europea. En este sentido, García-Gutiérrez y Rodríguez-Meza (2012) señalaron que el incumplimiento de los LMR, independientemente del alimento evaluado, y la presencia de residuos de plaguicidas prohibidos, pueden asociarse a una tasa baja de asistencia técnica recibida por los productores agrícolas de dicha región.

Asimismo, Calderón et al. (2022) evaluaron la presencia de residuos de plaguicidas en vegetales comercializados en México y Chile en el periodo comprendido entre 2018 y 2019. Dentro de los productos agrícolas analizados, en ambos países se encontró el tomate, aunque en el caso de México este correspondió a producción tanto convencional como orgánica proveniente de ocho estados de la República (Baja California, Ciudad de México, Nayarit, Nuevo León, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala y Yucatán). En los productos hortícolas convencionales la frecuencia de detección de al menos un plaguicida fue del 55.88 %, mientras que en los orgánicos fue del 30.77 %; los residuos presentes variaron entre los tipos de vegetales y el área geográfica de origen. Se observó que 14 residuos (nueve en productos convencionales y cinco en orgánicos) estuvieron por encima de los LMR establecidos en la Unión Europea, aunque ninguno superó los LMR establecidos en la normativa mexicana. En los cultivos convencionales, el tomate ocupó el tercer lugar de los cuatro vegetales con presencia de residuos y el cuarto en cultivos orgánicos. Las concentraciones de plaguicidas en ambos tipos de cultivo (orgánicos y convencionales) fue similar. En tomate convencional se reportó la presencia de clorpirifos, cipermetrina y carbarilo en concentraciones promedio de  $0.018 \pm 0.043$ ,  $0.011 \pm 0.019$  y  $0.011 \pm 0.015$  mg/kg, respectivamente, mientras que en tomate orgánico los residuos de plaguicidas presentes correspondieron a carbarilo y cipermetrina en concentraciones promedio de  $0.007 \pm 0.009$  y  $0.008 \pm 0.014$  mg/kg, respectivamente.

En otras regiones del mundo también ha sido motivo de preocupación el monitoreo de la presencia de residuos de plaguicidas en tomate. Tal es el caso de

Arabia Saudita (Ramadan et al. 2020), Bangladesh (Hossain et al. 2015), Chile (Elgueta et al. 2020, 2021), China (Yu et al. 2016), Egipto (El-Sheikh et al. 2023), Ghana (Bempah et al. 2011), Polonia (Szpyrka et al. 2015), Uganda (Ssemugabo et al. 2022) y Zambia (Mwanja et al. 2017). La conclusión que se desprende de los estudios previos y del aquí presentado es la necesidad imperiosa de establecer programas de monitoreo a nivel nacional más estrictos, tanto para productos agrícolas de importación como de exportación, e incluso para aquellos que son consumidos en el mercado local o regional; asimismo, la revisión constante de la normatividad relativa a la presencia de plaguicidas en alimentos de origen vegetal, de manera que sea actualizada anualmente para que la presencia de éstos no merme la salud de los consumidores, especialmente la de niños, adultos mayores y personas inmunocomprometidas, que son más vulnerables a los efectos adversos de este tipo de contaminantes, garantizando así la seguridad e inocuidad alimentaria.

#### **Análisis de riesgos asociados a la salud en niños y adultos**

Una de las principales vías de exposición a residuos de plaguicidas es a través de la ingesta de alimentos, los cuales se distribuyen a través del torrente sanguíneo para después ser excretados, principalmente a través del sudor y la orina. Su toxicidad varía de acuerdo con el tipo de plaguicida, la dosis, la vía de entrada y la sensibilidad individual (Kim et al. 2017). Diversos estudios relacionan a los plaguicidas con enfermedades como cáncer, leucemia y asma (Kim et al. 2017). Es de particular interés la exposición en niños, mujeres embarazadas o personas de avanzada edad, ya que son más sensibles a los efectos negativos de estos compuestos, debido a que su sistema inmunitario se encuentra en desarrollo o decaimiento (Banerjee 1999, Pope 2010, Cestonaro et al. 2022). En este sentido, de acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio (**Cuadro II**) se puede observar que los valores de IDE calculados en adultos, para los cuatro plaguicidas (metamidofos, lambda cialotrina, *p,p'*-DDE y malatión) cuantificados en las muestras de tomate, son inferiores al valor de la IDA calculada a concentración promedio y máxima; sin embargo, el valor de la IDE en niños para el malatión excede en aproximadamente un 45 % la IDA calculada, tanto a concentración promedio como máxima. Esto puede representar un peligro por la elevada toxicidad de este plaguicida organofosforado, que además se encuentra en la lista de sustancias peligrosas normadas por la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EUA (OSHA 2024).

**CUADRO II.** RIESGO ASOCIADO A LA SALUD POR EXPOSICIÓN A PLAGUICIDAS A TRAVÉS DEL CONSUMO DE TOMATE, EN NIÑOS Y ADULTOS, EN GUASAVE, SINALOA, MÉXICO.

Plaguicidas	IDA <sup>a</sup> (mg/kg de peso corporal/día)	IDE <sup>b</sup> adultos	IDE <sup>b</sup> niños	CR <sup>b</sup> adultos	CR <sup>b</sup> niños	IDE <sup>c</sup> adultos	IDE <sup>c</sup> niños	CR <sup>c</sup> adultos	CR <sup>c</sup> niños
Metamidofos	0.004	0.0002	0.0004	0.0496	0.0930	0.0002	0.0003	0.0496	0.0930
Lambda cialotrina	0.0025	0.0004	0.0007	0.1521	0.2852	0.0006	0.0012	0.2488	0.4665
<i>p,p'</i> -DDE <sup>d</sup>	0.01	0.0001	0.0002	0.0116	0.0217	0.0001	0.0002	0.0131	0.0245
Malatión	0.03	0.0230	<b>0.0431</b>	0.7655	<b>1.4353</b>	0.0251	<b>0.0471</b>	0.8375	<b>1.5703</b>
				Suma	1.8352		1.1490		2.1543

<sup>a</sup>IDA: ingesta diaria aceptable en mg/kg de peso corporal/día (tomado de Pesticide Properties DataBase, <https://sitem.herts.ac.uk/aeu/ppdb/>); <sup>b</sup>IDE: ingesta diaria estimada en mg/kg/día; CR: coeficiente de riesgo (cálculo realizado con la concentración promedio); <sup>c</sup>IDE: ingesta diaria estimada en mg/kg/día; CR: coeficiente de riesgo (cálculo realizado con la concentración máxima); <sup>d</sup>DDE: diclorodifenilcloruroetíleno.

Nota: En el caso de las columnas de CR, las cifras en negritas significan valores superiores a la unidad, mientras que en las columnas de IDE significan valores superiores a la IDA.

Por otro lado, de acuerdo con los valores de CR calculados tanto para adultos como para niños, el valor obtenido para el malatión en niños es mayor a 1, tanto para la concentración promedio como para la máxima concentración, lo que indica un riesgo potencial para la salud de los infantes menores de 12 años. En este sentido, al realizar la sumatoria de los CR en todos los escenarios, los niños son el grupo poblacional con mayor riesgo de presentar efectos de salud negativos si se siguen exponiendo a las concentraciones promedio de plaguicidas encontradas en nuestro estudio (**Cuadro II**). Además, si se toman en cuenta los valores máximos de concentración encontrados, los adultos pueden considerarse población en riesgo, tal como se puede comprobar con el valor obtenido de CR en adultos (1.15).

Son escasas las publicaciones que muestran resultados de estudios en los cuales se estime el riesgo a la salud asociado con el consumo de residuos de plaguicidas presentes en alimentos, como el tomate. Entre éstas, Calderón et al. (2022) evaluaron el índice acumulado de riesgo a la salud en la población de Chile y México, tanto en niños como en adultos, y encontraron que la lambda cialotrina es el plaguicida detectado con más frecuencia, aunque no en mayor concentración, en diversos vegetales de ambos países. No obstante, la IDE no excedió en ningún caso la IDA. Por otro lado, Dione et al. (2023) muestrearon y analizaron tomate de mercados locales de Ouagadougou, Burkina Faso, y encontraron que más del 60 % de sus muestras contenían al menos un plaguicida en concentraciones altas, incluyendo DDT y lambda cialotrina; estos investigadores concluyeron que el uso de dichos plaguicidas es muy común y se suelen emplear de manera combinada, de tal modo que es frecuente encontrarlos en muestras de vegetales frescos de consumo directo. En Brasil, Bissacotti y Costabeber (2022) estudiaron el riesgo de exposición crónica a residuos de plaguicidas por el consumo de tomates; calcularon la IDE y la IDA para 46 plaguicidas y encontraron que la población brasileña no estuvo expuesta a un riesgo crónico a través de la dieta por consumo de tomates con residuos de plaguicidas. Sin embargo, en Tanzania, en la región de Arusha, Kariathi et al. (2016) reportaron que el consumo de tomates frescos puede representar un riesgo para la salud por la presencia de clorpirifos, permeterina y ridomil. Asimismo, Elgueta et al. (2021) describieron riesgos importantes para la población chilena en la región metropolitana de Chile, debido a las altas concentraciones de metamidofos, metomil y ciprodinilo en tomates y lechugas. El valor de CR más alto correspondió al metamidofos en todas las evaluaciones del estudio.

## CONCLUSIONES

La producción y comercialización de tomate en Guasave, Sinaloa, México es una de las actividades económicas que genera importantes ingresos a la región. Para evitar pérdidas en la cosecha, los productores practican una agricultura de tipo intensivo que requiere un uso elevado y constante de plaguicidas químicos, que por su naturaleza intrínseca son tóxicos no sólo para el organismo diana (plaga), sino para humanos. Por ello es recomendable la vigilancia exhaustiva de los residuos de plaguicidas en los productos agrícolas de consumo humano, ya que muchos de estos compuestos, aún a bajas concentraciones, pueden generar efectos negativos en la salud. Es importante tomar en cuenta que la toxicidad varía de acuerdo con el tipo de plaguicida, la dosis, y la sensibilidad individual. De acuerdo con los resultados obtenidos, residuos de metamidofos, lambda cialotrina, *p,p'*-DDE y malatión fueron encontrados en muestras de tomate. Con base en el cálculo de la IDE y el CR para malatión (a concentraciones promedio y máxima), este plaguicida es el que presenta un alto potencial de riesgo para la población consumidora de tomate producido en Guasave, aunque también debe considerarse el posible efecto aditivo y/o sinérgico entre los distintos plaguicidas encontrados en un mismo producto. Es importante resaltar que el metamidofos, la lambda cialotrina y el *p,p'*-DDE ya han sido prohibidos, principalmente por el CAC y otros convenios internacionales, debido a sus efectos negativos en seres humanos y el medio ambiente, por lo cual es necesario desincentivar su uso.

Por lo anterior, es necesario que México mantenga su marco regulatorio en constante evolución para adaptarse al avance en la comprensión de los impactos negativos de estos compuestos en la salud y el medio ambiente.

## AGRADECIMIENTOS

JBLM agradece al Dr. en Sustentabilidad Ricardo de Jesús Aguilar Romero por su apoyo en la elaboración del mapa del área de estudio.

## REFERENCIAS

Álvarez-Medina M.T., Núñez Ramírez M.A. y Wendlandt Amezaga T.R. (2017). Caracterización de la cadena de valor del tomate rojo fresco en México. Revista Global de Negocios 5 (3), 45-58.

- Arias L.A., Garzón A., Ayarza A., Aux S. y Bojacá C.R. (2021). Environmental fate of pesticides in open field and greenhouse tomato production regions from Colombia. Environmental Advances 3 (2), 100031. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100031>
- Banerjee B. D. (1999). The influence of various factors on immune toxicity assessment of pesticide chemicals. Toxicology Letters 107 (1-3), 21-31. [https://doi.org/10.1016/S0378-4274\(99\)00028-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4274(99)00028-4)
- Bastidas-Bastidas P.J., Leyva-Morales J.B., Barraza-Lobo A.L., Olmeda-Rubio C., Pineda-Landeros J.M. y Ramírez-Reyes J.F. (2014). Evaluación de los datos de monitoreo sobre niveles de residuos de plaguicidas en hortalizas cultivadas en el valle agrícola de Culiacán, Sinaloa, México (periodo: 2011-2013). En: Investigaciones en inocuidad de los alimentos (L.O. Orozco-Hernández, L.E. Garay-Martínez, M.R. Torres-Vitela, Eds.). Universidad de Guadalajara, Jalisco, México, 20-23.
- Bastidas-Bastidas P.J., Leyva-Morales J.B., Olmeda-Rubio C., Pineda-Landeros J.M. y Martínez-Rodríguez I.E. (2019). Comparison of two methods for multi-residue analysis of organophosphorus pesticides in agricultural products with high and low moisture content. Revista Bio Ciencias 6 (2), e654. <https://doi.org/10.15741/revbio.06.02.05>
- Bempah C.K., Buah-Kwofie A., Denutsui D., Asomaning J. y Tutu A.O. (2011). Monitoring of pesticide residues in fruits and vegetables and related health risk assessment in Kumasi Metropolis, Ghana. Research Journal of Environmental and Earth Sciences 3 (6), 761-771.
- Berrospe-Ochoa E.A., Saucedo-Veloz C., Ramírez-Guzmán M.E. y Saucedo-Reyes D. (2018). Componentes del sabor y contenido de ácido ascórbico de jitomates (*Solanum lycopersicum* L.) nativos e híbridos comerciales. Agrociencia 52 (4), 623-638.
- Bissacotti A.P. y Costabeber I.H. (2022). Estimation of the risk of chronic exposure of the Brazilian population to pesticide residues by eating table tomatoes. Brazilian Archives of Biology and Technology 65, e22210477. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-202210477>
- CAC (2016). Guidelines on performance criteria for methods of analysis for the determination of pesticide residues in food and feed. Codex Alimentarius Commission [en línea]. <http://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/thematic-areas/pesticides/en/> 10/12/21
- Calderón R., García-Hernández J., Palma P., Leyva-Morales J.B., Zambrano-Soria M., Bastidas-Bastidas P.J. y Godoy M. (2022). Assessment of pesticide residues in vegetables commonly consumed in Chile and Mexico: Potential impacts for public health. Journal of Food Composition and Analysis 108, 104420. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104420>

- Cestonaro L. V., Macedo S. M. D., Piton Y. V., Garcia S. C. y Arbo M.D. (2022). Toxic effects of pesticides on cellular and humoral immunity: An overview. *Immunopharmacology and Immunotoxicology* 44 (6), 816-831. <https://doi.org/10.1080/08923973.2022.2096466>
- COFEPRIS (2016). Catálogo oficial de plaguicidas. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios, Ciudad de México, México, 664 pp.
- Craveiro de Andrade J., Galvan D., Kato L.S. y Conte-Junior C.A. (2023). Consumption of fruits and vegetables contaminated with pesticide residues in Brazil: A systematic review with health risk assessment. *Chemosphere* 322, 138244. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138244>
- Díaz-Vallejo J., Barraza-Villarreal A., Yáñez-Estrada L. y Hernández-Cadena L. (2021). Plaguicidas en alimentos: riesgo a la salud y marco regulatorio en Veracruz, México. *Salud Pública de México* 63 (4), 486-497. <https://doi.org/10.21149/12297>
- Dione M.M., Djouaka R., Mbokou S.F., Ilboudo G.S., Ouedraogo A.A., Dinede G., Roesel K., Grace D. y Knight-Jones T.J.D. (2023). Detection and quantification of pesticide residues in tomatoes sold in urban markets of Ouagadougou, Burkina Faso. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 7,1213085. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1213085>
- EFSA (2007). The EFSA's 7th scientific colloquium report-cumulative risk assessment of pesticides to human health: The way forward. European Food Safety Authority Supporting Publications 4 (5), 117E. <https://doi.org/10.2903/sp.efsa.2007.EN-117>
- EFSA (2013). The 2010 European Union report on pesticide residues in food. European Food Safety Authority Journal 11 (3), 3130. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2013.3130>
- Elgueta S., Valenzuela M., Fuentes M., Meza P., Manzur J.P., Liu S., Zhao G. y Correa A. (2020). Pesticide residues and health risk assessment in tomatoes and lettuces from farms of metropolitan region Chile. *Molecules* 25 (2), 355. <https://doi.org/10.3390/molecules25020355>
- Elgueta S., Valenzuela M., Fuentes M., Ulloa P.E., Ramos C., Correa A. y Molinett S. (2021). Analysis of multi-pesticide residues and dietary risk assessment in fresh tomatoes (*Lycopersicum esculentum*) from local supermarkets of the metropolitan region, Chile. *Toxics* 9 (10), 249. <https://doi.org/10.3390/toxics9100249>
- El-Sheikh E.S.A., Li D., Hamed I., Ashour M.B. y Hammock B.D. (2023). Residue analysis and risk exposure assessment of multiple pesticides in tomato and strawberry and their products from markets. *Foods* 12 (10), 1936. <https://doi.org/10.3390/foods12101936>
- FDA (1999). Pesticide analytical manual. Vol. I: Multiresidue methods. 3rd ed. Food and Drug Administration, U.S. Department of Health and Human Services, Washington, D.C., EUA, 500 pp. [en línea]. <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/pesticide-analytical-manual-volume-i-pam-3rd-edition> 10/12/21
- García-Gutiérrez C. y Rodríguez-Meza G. D. (2012). Problemática y riesgo ambiental por el uso de plaguicidas en Sinaloa. *Ra Ximhai* 8 (3), 1-10.
- García-Hernández J., Leyva-Morales J.B., Bastidas-Bastidas P.J., Leyva-García G.N., Valdez-Torres J.B., Aguilar-Zarate G. y Betancourt-Lozano M. (2021). A comparison of pesticide residues in soils from two highly technified agricultural valleys in northwestern Mexico. *Journal of Environmental Science and Health Part B* 56 (6), 548-565. <https://doi.org/10.1080/03601234.2021.1918977>
- González-Márquez L.C., Félix-Gastélum R., Sandoval-Romero J.A., Escobedo-Urías D.C. y Longoria-Espinoza R.M. (2021). Caracterización de biofertilizantes utilizados en el valle agrícola de Guasave, Sinaloa, México. *Terra Latinoamericana* 39, 1-14, e859. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.859>
- Hatamleh A.A., Danish M., Al-Dosary M.A., El-Zaidy M. y Ali S. (2022). Physiological and oxidative stress responses of *Solanum lycopersicum* (L.) (tomato) when exposed to different chemical pesticides. *RSC Advances* 12 (12), 7237-7252. <https://doi.org/10.1039/d1ra09440h>
- Hlihor R.M., Pogācean M.O., Rosca M., Cozma P. y Gavrilescu M. (2019). Modelling the behavior of pesticide residues in tomatoes and their associated long-term exposure risks. *Journal of Environmental Management* 233, 523-529. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.045>
- Hossain M.S., Fakhruddin A.N.M., Alamgir Zaman Chowdhury M., Rahman M.A. y Khorshed Alam M. (2015). Health risk assessment of selected pesticide residues in locally produced vegetables of Bangladesh. *International Food Research Journal* 22 (1), 110-115.
- Kalyabina V.P., Esimbekova E.N., Kopylova K.V. y Kratasyuk V.A. (2021). Pesticides: Formulants, distribution pathways and effects on human health – A review. *Toxicology Reports* 8, 1179-1192. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.06.004>
- Kariathi V., Kassim N. y Kimanya M. (2016). Pesticide exposure from fresh tomatoes and its relationship with pesticide application practices in Meru district. *Cogent Food and Agriculture* 2 (1), 1196808. <https://doi.org/10.1080/23311932.2016.1196808>
- Kim K.H., Kabir E. y Jahan S.A. (2017). Exposure to pesticides and the associated human health effects. *Science of The Total Environment* 575 (1), 525-535. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.009>

- Lee G.H. y Choi K.C. (2020). Adverse effects of pesticides on the functions of immune system. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology 235, 108789. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2020.108789>
- Lewis K.A., Tzilivakis J., Warner D.J. y Green A. (2016). An international database for pesticide risk assessment and management. Human and Ecological Risk Assessment 22 (4), 1-15. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- Leyva Morales J.B., García de la Parra L.M., Bastidas Bastidas P.J., Astorga Rodríguez J.E., Bejarano Trujillo J., Cruz Hernández A., Martínez-Rodríguez I. E. y Betancourt Lozano M. (2014). Uso de plaguicidas en un valle agrícola tecnificado en el norte de México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 30(3), 247-261.
- Leyva-Morales J.B., Valdez-Torres J.B., Bastidas-Bastidas P.J., Angulo- Escalante M.A., Sarmiento-Sánchez J.I., Barraza-Lobo A.L., Olmeda-Rubio C. y Chaidez-Quiroz C. (2017). Monitoring of pesticides residues in northwestern Mexico rivers. Acta Universitaria 27 (1), 45-54. <https://doi.org/10.15174/au.2017.1203>
- Leyva-Morales J.B., Bastidas-Bastidas P.J., Muñiz-Valencia R., Ceballos Magaña S.G., Ponce-Vélez G., Aguilera-Márquez D., Grajeda-Cota P., Navidad-Murrieta M.S., Flores-Munguía M.F., Ramírez-Castillo J.A., Romeros-Bañuelos C.A., Ruiz-Ramos R., Aguilar-Zarate G. y Huerta-Beristain G. (2019). Measurement of organochlorine pesticides in drinking water: Laboratory technical proficiency testing in Mexico. Accreditation and Quality Assurance 24, 451-461. <https://doi.org/10.1007/s00769-019-01403-w>
- López-Gaxiola L.A., Leyva-Morales J.B., Izaguirre Díaz de León F., Perea-Domínguez X.P., Soto-Alcalá J. y Martínez-Valenzuela M.C. (2021). Uso del agua en las actividades agrícolas en el distrito de riego 063, Guasave, Sinaloa. Ciencia Latina. Revista Multidisciplinar 5 (5), 9496-9521. [https://doi.org/10.37811/cl\\_recm.v5i5.998](https://doi.org/10.37811/cl_recm.v5i5.998)
- Magnusson B. y Örnemark U. (2014). Eurachem guide: The fitness for purpose of analytical methods – A laboratory guide to method validation and related topics. 2nd ed. Eurachem, Londres, Reino Unido, 60 pp.
- Maldonado-Peralta M.A., Salinas-Vargas D., Rojas-García A.R., Hernández-Bautista A., Alvarez-Vázquez P. y Maldonado-Peralta R. (2023). Comportamiento agronómico de poblaciones de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) nativo bajo dos sistemas de producción: calidad agronómica de tomate en dos ambientes. Revista Bio Ciencias 10, e1413. <https://doi.org/10.15741/revbio.10.e1413>
- Martínez-Bueno M.J., García-Valverde M., Gómez-Ramos M.M., Salinas-Andújar J.A., Barceló D. y Fernández-Alba A.R. (2022). Fate, modeling, and human health risk of organic contaminants present in tomato plants irrigated with reclaimed water under real-world field conditions. Science of The Total Environment 806 (4), 150909. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150909>
- Martins Moura A.C., Neves Lago I., Fernandes Cardoso C., Dos Reis Nascimento A., Pereira I. y Gontijo Vaz B. (2020). Rapid monitoring of pesticides in tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) during pre-harvest intervals by paper spray ionization mass spectrometry. Food Chemistry 310, 125938. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125938>
- Mnif W., Hassine A.I.H., Bouaziz A., Bartegi A., Thomas O. y Roig B. (2011). Effect of endocrine disruptor pesticides: A review. International Journal of Environmental Research and Public Health 8 (6), 2265-2303. <https://doi.org/10.3390/ijerph8062265>
- Mwanja M., Jacobs C., Mbewe A.R. y Munyinda N.S. (2017). Assessment of pesticide residue levels among locally produced fruits and vegetables in Monze district, Zambia. International Journal of Food Contamination 4 (1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s40550-017-0056-8>
- Orona-Castillo I., del Toro-Sánchez C.L., Fortis-Hernández M., Preciado-Rangel P., Espinoza-Arellano J.J., Rueda-Puente E., Flores-Vázquez M. y Cano-Ríos P. (2022). Indicadores técnico-económicos de la producción del cultivo de tomate bajo agricultura protegida en la Comarca Lagunera, México. Biotecnia 24 (3), 70-76. <https://doi.org/10.18633/biotecnia.v24i3.1721>
- OSHA (2024). Sustancias peligrosas. Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo [en línea]. <https://osha.europa.eu/es/themes/dangerous-substances> 10/10/23
- Pérez M.A., Navarro H. y Miranda E. (2013). Residuos de plaguicidas en hortalizas: problemática y riesgo en México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 29 (número especial sobre plaguicidas), 45-64.
- Pérez-Lizaur A.B., Palacios-González B., Castro-Becerra A.L. y Flores-Galicia I. (2014). Sistema mexicano de alimentos equivalentes. 3ra ed. Fomento de Nutrición y Salud, A.C., Ciudad de México, México, 63 pp.
- Pérez-Olvera M.A., Navarro-Garza H. y Miranda-Cruz E. (2011). Use of pesticides for vegetable crops in Mexico. En: Pesticides in the modern world-pesticides use and management (M. Stoytcheva, Ed.). Intech, Rijeka, Croacia, 97-118. [en línea]. <http://www.intechopen.com/books/pesticides-in-the-modern-world-pesticides-use-and-management/use-of-pesticides-for-vegetable-crops-in-mexico> 18/03/2022

- Pope C. (2010). The influence of age on pesticide toxicity. En: Hayes' handbook of pesticide toxicology (R. Krieger, Ed.). Academic Press, Londres, Reino Unido, 819-835.
- Ramadan M.F.A., Abdel-Hamid M.M.A., Altorgoman M.M.F., AlGaramah H.A., Alawi M.A., Shati A.A., Shweeta H.A. y Awwad N.S. (2020). Evaluation of pesticide residues in vegetables from the Asir Region, Saudi Arabia. *Molecules* 25 (1), 205. <https://doi.org/10.3390/molecules25010205>
- Rodríguez-Martínez A., Zhou B., Sophiea M.K., Bentham J., Paciorek C.J., Iurilli M.L., et al. (2020). Height and body-mass index trajectories of school-aged children and adolescents from 1985 to 2019 in 200 countries and territories: A pooled analysis of 2181 population-based studies with 65 million participants. *The Lancet* 396 (10261), 1511-1524. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)31859-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)31859-6)
- Salehi B., Sharifi-Rad R., Sharopov F., Namiesnik J., Roo-intan A., Kamle M. y Sharifi-Rad J. (2019). Beneficial effects and potential risks of tomato consumption for human health: An overview. *Nutrition* 62, 201-208. <https://doi.org/10.1016/j.nut.2019.01.012>
- SAGARPA (2016). Planeación agrícola nacional 2017-2030. Jitomate mexicano. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [en línea]. [www.gob.mx/sagarpa](http://www.gob.mx/sagarpa) 18/05/2022
- Schleiffer M. y Speiser B. (2022). Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain – A review. *Environmental Pollution* 313 (7), 120116. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120116>
- SIAP (2022). Escenario mensual de productos agroalimentarios. Dirección de Análisis Estratégicos. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera [en línea]. <https://www.gob.mx/siap/documentos/reporte-mensual-de-escenarios-de-18-productos-agroalimentarios-2022> 28/08/2022
- Singh S., Saini L.K., Solanki V.H., Kansara R.V., Gandhi K.D. y Patel N. (2023). Dissipation kinetics and health risk assessment of certain insecticides applied in/on tomato under open field and poly-house conditions. *Heliyon* 9 (4), e14963. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14963>
- Ssemugabo C., Bradman A., Ssempebwa J.C., Sillé F. y Guwatudde D. (2022). An assessment of health risks posed by consumption of pesticide residues in fruits and vegetables among residents in the Kampala Metropolitan Area in Uganda. *International Journal of Food Contamination* 9 (1), 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40550-022-00090-9>
- Szpyrka E., Kurdziel A., Rupar J. y Slowik-Borowiec M. (2015). Pesticide residues in fruit and vegetable crops from the central and eastern region of Poland. *Roczniki Państwowego Zakładu Higieny* 66 (2), 107-113.
- Tripathy V., Sharma K.K., Sharma K., Gupta R., Yadav R., Singh G., Aggarwal A. y Walia S. (2022). Monitoring and dietary risk assessment of pesticide residues in brinjal, capsicum, tomato, and cucurbits grown in northern and western regions of India. *Journal of Food Composition and Analysis* 110 (5), 104543. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104543>
- UH (2022). Pesticide properties database. University of Hertfordshire, Reino Unido [en línea]. <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/index.htm> 10/12/2020
- Weinberg J. (2009). Guía para las ONG sobre los plaguicidas peligrosos y el SAICM. Marco de acción para proteger la salud humana y el medio ambiente de los plaguicidas peligrosos. Red Internacional de Eliminación de los COP, 74 pp. [en línea] [http://www2.unitar.org/cwm/publications/cw/inp/IOMC\\_Resource\\_Guide\\_18\\_Jan\\_08\\_Final\\_ESP.pdf](http://www2.unitar.org/cwm/publications/cw/inp/IOMC_Resource_Guide_18_Jan_08_Final_ESP.pdf) 25/03/2022
- WHO (2012) Inventory of evaluation performed by the joint meeting on pesticides residues (JMPR). World Health Organization [en línea]. <http://apps.who.int/pesticide-residues-jmpr-database> 10/12/19
- Wondimu K.T. y Geletu A.K. (2023). Residue analysis of selected organophosphorus and organochlorine pesticide in commercial tomato fruits by gas chromatography mass spectrometry. *Heliyon* 9 (3), e14121. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14121>
- Yu R., Liu Q., Liu J., Wang Q. y Wang Y. (2016). Concentrations of organophosphorus pesticides in fresh vegetables and related human health risk assessment in Changchun, northeast China. *Food Control* 60, 353-360. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2015.08.013>

## MATERIAL COMPLEMENTARIO

**CUADRO CI. PARÁMETROS DE VALIDACIÓN DEL MÉTODO PARA LA DETERMINACIÓN DE RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN TOMATE.**

Plaguicidas	Límite de detección	Límite de cuantificación	Porcentaje de recuperación (%)	Coeficiente de variación (%)	Coeficiente de determinación ( $R^2$ )
Metamidofos	0.003	0.009	89.12	8.73	0.998
Pentacloroanilina	0.01	0.03	86.97	7.58	0.999
Lambda cialotrina	0.006	0.018	97.44	3.80	0.999
<i>p,p'</i> -DDE (diclorodifenildicloroetileno)	0.002	0.006	99.13	8.28	0.998
Malatión	0.002	0.006	101.06	7.03	0.997
Acefate	0.004	0.012	100.44	8.02	0.998
Diclorvos	0.003	0.009	96.00	6.77	0.998
Dimetoato	0.002	0.006	96.53	7.00	0.997
Diazinón	0.002	0.006	98.14	6.06	0.996
Paratión metilo	0.001	0.003	95.77	7.26	0.996
Clorpirifos	0.002	0.006	100.73	5.76	0.999
Azinfos metilo	0.004	0.012	94.99	13.24	0.998
Pentacloronitrobenceno	0.002	0.006	84.45	9.48	0.998
Clorotalonil	0.006	0.018	95.55	8.63	0.998
Heptacloro	0.010	0.03	82.48	9.14	0.998
Aldrín	0.001	0.003	89.52	8.70	0.997
Captán	0.010	0.03	95.42	8.74	0.998
Fipronil	0.001	0.003	89.10	7.60	0.991
Endosulfán alfa	0.003	0.009	94.36	6.69	0.995
Clorfenapir	0.006	0.018	95.96	7.79	0.999
Endosulfán beta	0.003	0.009	95.63	7.28	0.995
Endosulfán sulfato	0.003	0.009	95.66	7.08	0.996
Bifentrina	0.002	0.006	98.92	5.73	0.998
Cis permetrina	0.005	0.015	99.02	10.36	0.994
Trans permetrina	0.005	0.015	99.01	6.58	0.994
Ciflutrina	0.002	0.006	95.09	2.86	0.995
Cipermetrina	0.001	0.003	99.80	2.68	0.993
Deltametrina	0.010	0.03	91.99	5.76	0.998

DDE: diclorodifenildicloroetileno.