

DOI: 10.24850/j-tyca-18-02-03

Artículos

Thiamethoxam en la cuenca del río Jamapa y Cotaxtla, Veracruz, México y su variación estacional

Thiamethoxam in the Jamapa and Cotaxtla river basin, Veracruz, Mexico and its seasonal variation

María del Refugio Castañada-Chávez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9209-0431>

Juan Valente Megchun-García², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2902-8088>

Isabel Araceli Amaro-Espejo³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7115-5486>

María de Lourdes Fernández-Peña⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5144-9786>

Fabiola Lango-Reynoso⁵, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8359-434X>

David Reynier-Valdés⁶, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5341-0888>

¹Tecnológico Nacional de México, Veracruz, México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México, mariacastaneda@bdelrio.tecnm.mx

²Tecnológico Nacional de México, Veracruz, México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, Veracruz, México, valente.mg@bdelrio.tecnm.mx



³Tecnológico Nacional de México, Veracruz, México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México, isabelamaro@bdelrio.tecnm.mx

⁴Tecnológico Nacional de México, Veracruz, México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México, lourdesfernandez@bdelrio.tecnm.mx

⁵Tecnológico Nacional de México, Veracruz, México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México, fabiolalango@bdelrio.tecnm.mx

⁶Tecnológico Nacional de México, Veracruz, México. Instituto Tecnológico de Boca del Río, Boca del Río, Veracruz, México, davidreynier@bdelrio.tecnm.mx

Autor de correspondencia: Juan Valente Megchún García, valente.mg@bdelrio.tecnm.mx, megchj@gmail.com

Resumen

El thiamethoxam es un neonicotinoide de segunda generación que fue liberado al mercado a principios de los años 2000. Se transporta en el suelo por escorrentía y lixiviación y, de esta manera, llega a aguas superficiales y subterráneas. Se acumula en sedimentos y puede afectar la vida acuática, en especial a invertebrados como la pulga de agua (*Daphnia magna*) y la mosca de los lagos (*Chironomus riparius*). El objetivo es cuantificar la concentración del thiamethoxam en agua superficial de los ríos de la cuenca del Jamapa-Cotaxtla, Veracruz, México durante dos temporadas. Para el estudio se identificaron sobre el río de

Cotaxtla nueve sitios de muestreo y siete sitios de muestreo en el río Jamapa; el muestreo fue con base en la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 y la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-104-1988. La cuantificación del thiamethoxam en agua se realizó con un cromatógrafo de líquidos de alta resolución HPLC-UV, Thermo scientific, modelo Finnigan Surveyor del laboratorio LIRA (ITBOCA). El nivel más alto de thiamethoxam en agua fue de 0.6 ppm, ubicado en el Sitio 5 en el municipio de Cotaxtla; la concentración supera el Límite Máximo de Residualidad (LMR) establecido por la USEPA de 0.0175 ppm. También, se encontró que el thiamethoxam en el cauce del río Cotaxtla presentó valores altos de ≥ 0.24 ppm. Se concluye que existen concentraciones de thiamethoxam en los ríos de Cotaxtla y Jamapa, con potencial de riesgo ecológico para los ecosistemas acuáticos en la cuenca de Jamapa y Cotaxtla.

Palabras clave: plaguicida, thiamethoxam, análisis del agua, contaminación del agua, cuenca fluvial, río, ecosistema acuático, Veracruz, México.

Abstract

Thiamethoxam is a second-generation neonicotinoid that was released to the market in the early 2000s. It is transported in the soil by runoff and leaching, thus reaching surface and groundwater. It accumulates in sediments and can affect aquatic life, especially invertebrates such as the water flea (*Daphnia magna*) and the lake fly (*Chironomus riparius*). The objective is to quantify the concentration of thiamethoxam in surface water of the rivers of the Jamapa-Cotaxtla basin, Veracruz, Mexico during two seasons. For the study, nine sampling sites were identified on the Cotaxtla River and seven sampling sites on the Jamapa River. Sampling

was conducted according to Mexican Standard NMX-AA-003-1980 and Mexican Official Standard NOM-AA-104-1988. Thiamethoxam quantification in water was performed using a Thermo Scientific Finnigan Surveyor high-performance liquid chromatograph (HPLC-UV) at the LIRA laboratory (ITBOCA). The highest level of thiamethoxam in water was 0.6 ppm, located at Site 5 in the municipality of Cotaxtla. This concentration exceeds the Maximum Residue Limit (MRL) established by the USEPA of 0.0175 ppm. Thiamethoxam was also found in the Cotaxtla River channel at levels ≥ 0.24 ppm. It is concluded that thiamethoxam concentrations exist in the Cotaxtla and Jamapa rivers, posing a potential ecological risk to aquatic ecosystems in the Jamapa and Cotaxtla basin.

Keywords: pesticides, thiamethoxam, water analysis, water pollution, river basins, rivers, aquatic ecosystems, Veracruz, Mexico.

Recibido: 19/02/2026

Aceptado: 21/05/2026

Publicado *ahead of print*: 22/07/2026

1. Introducción

La contaminación del agua es un fenómeno de preocupación global resultado de las actividades antropogénicas (UNEP, 2016). En México, se desconoce información oficial del impacto negativo sobre los recursos hídricos por el uso de neonicotinoides en actividades del sector agropecuario. Sin embargo, cientos de plaguicidas de diferente naturaleza química son utilizados en la agricultura con el propósito de remover plagas de los cultivos (Tang *et al.*, 2021), sin considerar que estos compuestos

son transportados por diferentes vías a la cadena trófica y a los ambientes acuáticos (Castañeda-Chávez *et al.*, 2018).

El agua es el recurso natural más importante y la base de toda forma de vida; solo el 2.5% del recurso global es dulce (CONAGUA, 2011; Pereyra *et al.*, 2010). La contaminación no puntual o difusa involucra el transporte y la transformación de desechos a través de varios procesos físicos, químicos y/o biológicos, que pueden causar efectos en el aire, agua o suelo (Tomasini-Ortiz *et al.*, 2016). La calidad del agua de los ríos o arroyos en el sector agropecuario, es impactada por la contaminación puntual en más del 60% aproximadamente, los cuales generan contaminación orgánica y de minerales en los cuerpos receptores (Palomarez-García, 2010). Se destaca que países desarrollados, como Canadá, presentan problemas técnicos, políticos y de manejo respecto al control de las descargas no puntuales agrícolas. En Estados Unidos, las actividades antropogénicas, como la agricultura, contribuyen a la contaminación de las aguas superficiales (Anderson *et al.*, 2013). Aunque se espera que la producción agrícola mundial crezca un 15% para el año 2029, este crecimiento será más lento y estará basado en la autosuficiencia alimentaria, por lo que se busca un crecimiento económico más sostenible y, por la intensificación de los cultivos, un incremento de los contaminantes (Soares *et al.*, 2024).

El thiamethoxam es un compuesto neonicotinoide de segunda generación que fue liberado al mercado a principios de los años 2000, con el propósito de mitigar los problemas de contaminación asociados al uso de insecticidas organofosforados y carbamatos; presenta beneficios como alta actividad contra un amplio espectro de insectos-plagas, potente a bajas dosis, control a largo plazo, sistémicamente activo, con alto grado de efectividad en los cultivos (Sánchez-Alarcón *et al.*, 2021). Sin

embargo, existe preocupación respecto a la aplicación de los neonicotinoides (thiamethoxam) en los cultivos, ya que tienen una tendencia a lixiviarse a aguas superficiales y subterráneas, y generan un riesgo potencial para el manto freático, ya que la contaminación del agua puede resultar costosa, debido a que no existen prácticas de remediación aplicadas para la remoción de los neonicotinoides en aguas subterráneas (Megchun-García *et al.*, 2019; Sánchez-Alarcón *et al.*, 2021; Megchun-García *et al.*, 2024).

Los riesgos ambientales por el manejo ineficiente de los neonicotinoides son la contaminación del agua, suelo y aire, así como la residualidad en tejido humano y animal, los cuales difieren en su modo de acción, forma, metabolismo, eliminación y la toxicidad en organismos. En México, en el año 2016, se reportaron intoxicaciones y envenenamientos que provocaron 1,400 muertos; entre ellos, el 87% fueron adultos y el 13% niños (Sánchez-Alarcón *et al.*, 2021). Un dato importante es que la dispersión del contaminante depende de la frecuencia, forma y dosis de aplicación en los cultivos; aproximadamente el 1.6–28 % de los insecticidas neonicotinoides aplicados vía foliar serán aprovechados por el cultivo, mientras que el resto estará en el ambiente, o disperso en el suelo y agua (Anderson *et al.*, 2015). Predecir y conocer el comportamiento de un plaguicida en el ambiente es una labor compleja, pues depende de factores como la dosis de aplicación, las condiciones naturales durante su dispersión y las características químicas del plaguicida. Algunas de las características del thiamethoxam son su alta solubilidad de 4,100 mg/L a 20 °C, baja bioacumulación de -0.13 de lipofilicidad a 20 °C con pH de 7 y un índice potencial de lixiviación de GUS de 4.69, la presión de vapor (mPa) de 6.60×10^{-06} a 25 °C, la degradación de agua de 30.6 DT50 (días), la fotólisis en agua de 2.7-39.5

DT50 (días) y la hidrólisis en agua de 11.5 DT50 con pH de 9 (Morrissey *et al.*, 2015; University of Hertfordshire, 2026).

La estructura química del thiamethoxam presenta una isomería conformacional; la molécula contiene varios enlaces rotatorios, principalmente alrededor de los sustituyentes del anillo de oxidiazinano y la cadena lateral de nitroimino. No posee estereocentros ni forma isómeros geométricos (E/Z) en su forma comercializada, debido a que el grupo nitroimino está incorporado en un sistema cíclico que fija su orientación. Su fórmula química es $C_8H_{10}ClN_5O_3S$, contiene una pureza mínima de la sustancia activa de 980 g kg⁻¹, su origen es sintético, el modo de acción del thiamethoxam es por contacto, ingestión y bloquea los canales del receptor nicotínico de acetilcolina (nAChR). Los efectos conductuales y fisiológicos del insecticida son por neurotoxina. Fue descubierto en 1991, sin embargo, el primer registro fue en 1997 en Nueva Zelanda. Tiene un punto de fusión de 139.1 °C, el punto de degradación es de 147 °C, se descompone antes de hervir. La degradación en suelo (DT50) es de 50 días (Universidad de Hertfordshire, 2026).

Los neonicotinoides, durante o después de la dispersión, se encuentran presentes fundamentalmente como aerosoles que pueden ser rápidamente fotodegradados. La adsorción de neonicotinoides en suelos se encuentra altamente correlacionada con la presencia en ambientes acuáticos de modo inverso, particularmente durante los diferentes regímenes de lluvia. En el caso específico del $C_8H_{10}ClN_5O_3S$ (thiamethoxam), tiene un coeficiente de sorción bajo, por lo que su potencial de lixiviación resulta alto; estas características generan la probabilidad de encontrar metabolitos en agua subterránea que provienen del suelo y de la escorrentía (Anderson *et al.*, 2015). Se considera que los

factores como la precipitación, la velocidad y dirección del viento pueden incidir en la movilidad del thiamethoxam en el ambiente; esto es porque existe una interacción con los componentes bióticos y abióticos, que alteran o transforman la estructura del thiamethoxam y modifican las características fisicoquímicas y la acción biológica (Neov *et al.*, 2019; Hernández-Castellanos *et al.*, 2021). Por otra parte, la degradación microbiana es una alternativa para estudiar la biorremediación del thiamethoxam en agua y suelo de los agroecosistemas (Hladik *et al.*, 2014; Anderson *et al.*, 2015). Aunado al riesgo ambiental característico asociado al uso de thiamethoxam, es preciso tomar en cuenta las malas prácticas del Manejo Integrado de Plagas (MIP) y del mal manejo de los residuos peligrosos de los plaguicidas en el sector agropecuario, debido a que pueden causar contaminantes en el ambiente por residuos químicos de partículas en los equipos de aspersión, la mala aplicación y los defectos de los equipos (Ebanks-Mongalo *et al.*, 2013).

En el estado de Veracruz, México se encuentra ubicada la cuenca hidrológica Jamapa-Cotaxtla que recibe influencia de veinticinco municipios, con fuerte actividad agropecuaria, por ejemplo, los municipios de Medellín de Bravo, Manlio Fabio Altamirano, Paso del Macho, Soledad de Doblado, Córdoba, Amatlán de los Reyes y Cotaxtla. El municipio de Jamapa cuenta con una superficie sembrada de 2,557.02 ha y una superficie cosechada de 1,379.94 ha, y el municipio de Cotaxtla, tiene una superficie sembrada de 8,184.46 ha y una superficie cosechada de 5,984.47 ha. Ambos, municipios utilizan los neonicotinoides en el Manejo Integrado de Plagas (MIP) en las diferentes etapas de los cultivos (SIAP, 2024). De acuerdo con el diagnóstico sobre el manejo del thiamethoxam en el agroecosistema con papaya (*Carica papaya* Linnaeus) en Cotaxtla, Veracruz, el 6% de los productores de papaya emplean el insecticida y el

100% de esta población desconoce los efectos que el mal uso del insecticida provoca en el ambiente (Megchun-García *et al.*, 2017; EFSA, 2018). La finalidad del estudio consiste en generar conocimiento científico para proponer y plantear estrategias que permitan mejorar el manejo, uso y control del thiamethoxam en las actividades agrícolas. Por lo anterior, el objetivo fue cuantificar la concentración del thiamethoxam en agua superficial de los ríos de la cuenca del Jamapa-Cotaxtla, de Veracruz, México durante dos temporadas.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La cuenca del río Jamapa se encuentra ubicada entre los 18° 45' y 19° 14' latitud norte, y entre 95° 56' y 97° 17' longitud oeste (Figura 1, 2). Tiene una precipitación promedio anual de 1,468 mm y un área aproximada de 3,912 km², distribuida totalmente dentro del estado de Veracruz. El río Jamapa está formado por dos corrientes importantes, que en su confluencia se conocen con los nombres de río Cotaxtla y Jamapa; ambos desembocan en el Golfo de México en la población de Boca del Río, Veracruz. El río Cotaxtla drena un área de 1,679 km² (Pereyra *et al.*, 2010) y el municipio Cotaxtla representa el 11.5% de la cuenca (SEMARNAT *et al.*, 2017).

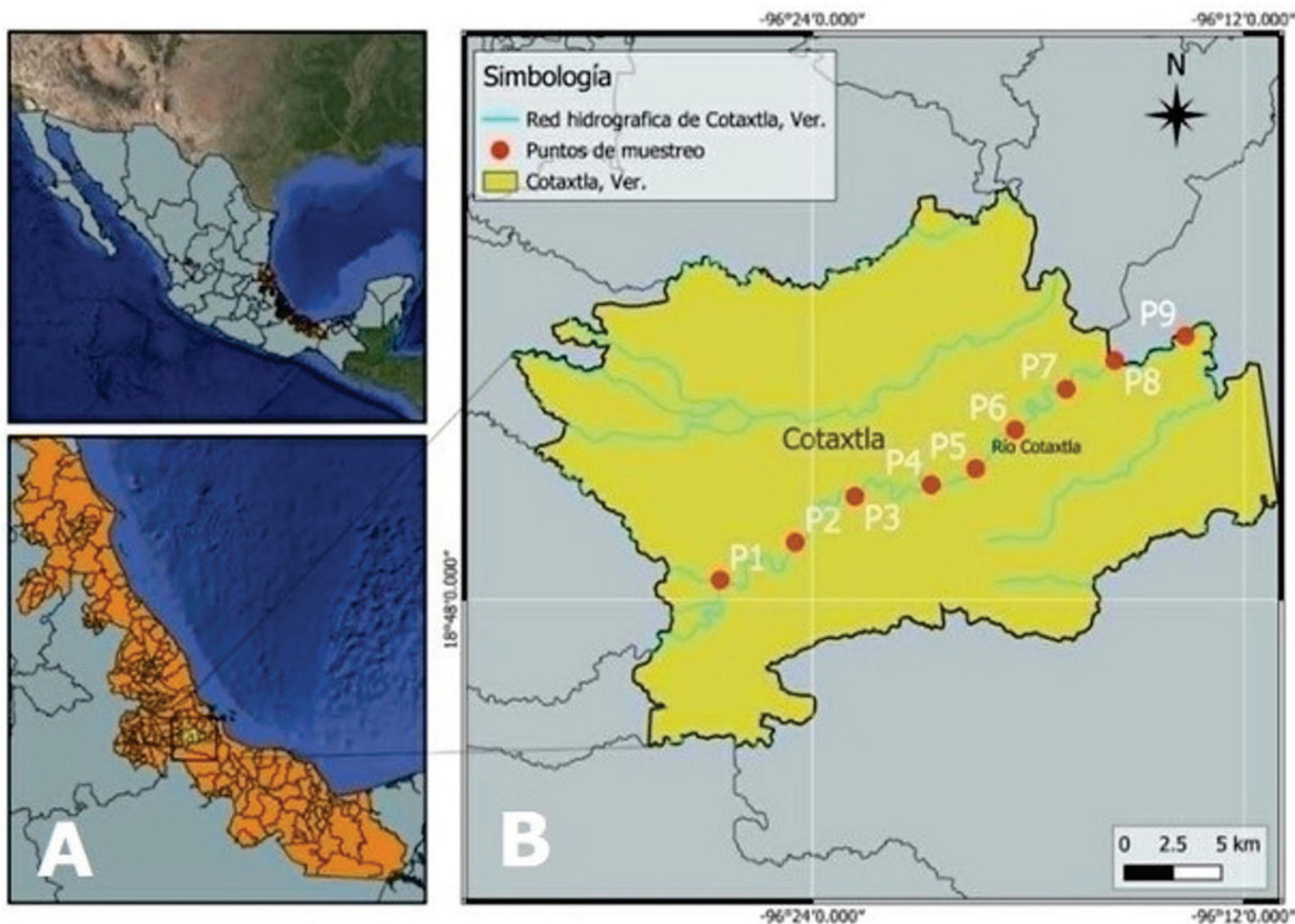


Figura 1. Cuenca del río Jamapa y Cotaxtla, del estado de Veracruz, México. A) Localización del estado de Veracruz, B) Puntos de muestreo en el río Cotaxtla (INEGI, 2026).

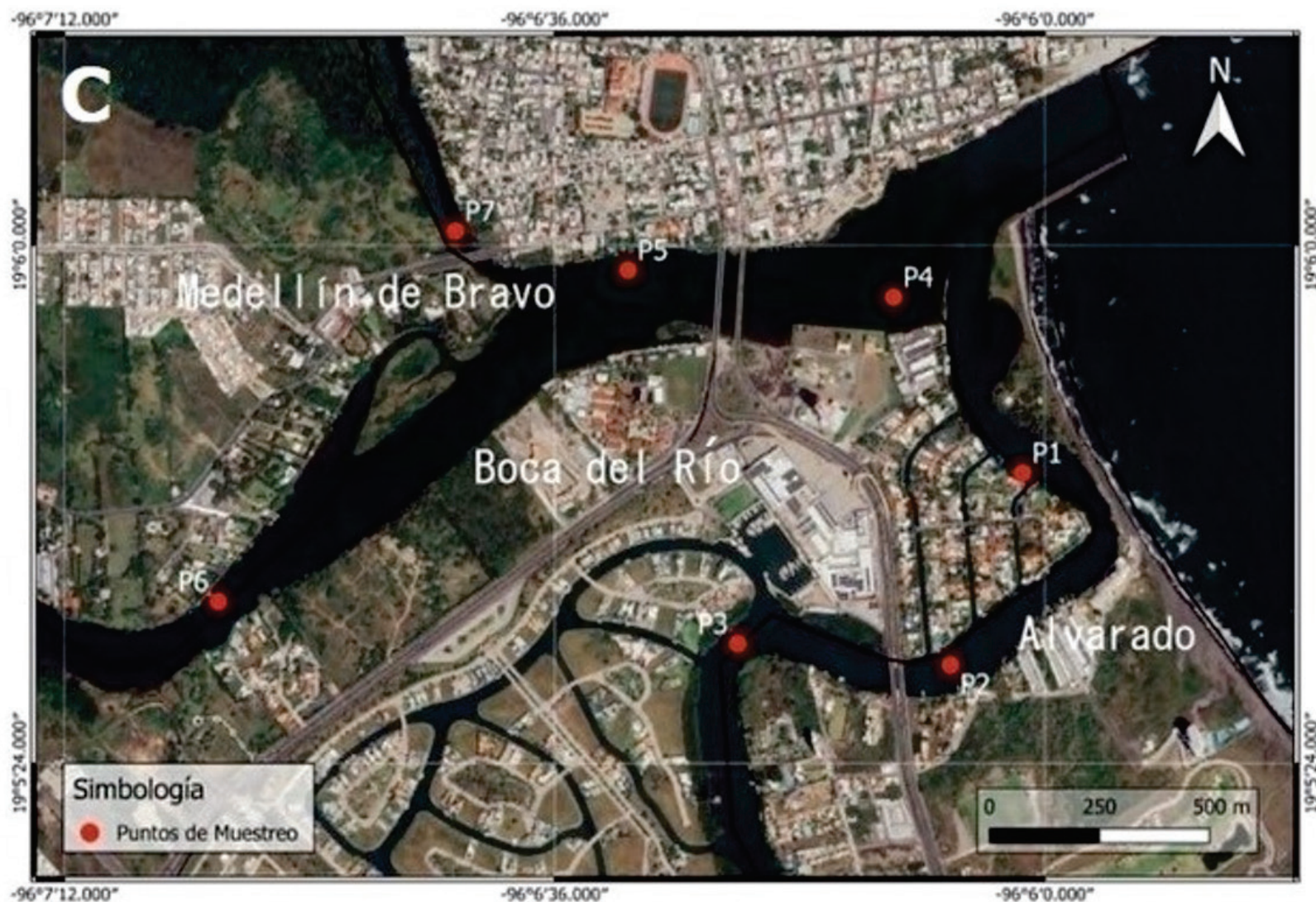


Figura 2. Cuenca del río Jamapa y Cotaxtla, del estado de Veracruz, México. C) Puntos de muestreo en el río Jamapa (Estero, Río y Arroyo Moreno) (INEGI, 2026).

2.2. Metodología

2.2.1. Sitios de muestreos

Se establecieron 16 sitios de muestreo, distribuidos en los dos ríos, nueve a lo largo del río Cotaxtla y siete en aguas del río Jamapa; de cada punto se colectaron muestras de agua por triplicado, de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-003-1980 y la Norma Oficial Mexicana de NOM-AA-104-1988; esta norma coincide totalmente con la Norma Internacional ISO 5667-10:2020. Water quality – Sampling - Part 10: Guidance on sampling of waste waters. Los puntos de muestreo en el río Jamapa fueron colectados en el Estero (P1, P2, P3), en el río (P4, P5, P6) y en el Arroyo Moreno ANP (P7). Los puntos de muestreo en el río Cotaxtla (P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7), se seleccionaron en áreas adyacentes donde se produce el cultivo de papaya (*Carica papaya* L.), sandía (*Citrullus lanatus*), limón Persa (*Citrus X latifolia* T.), maíz (*Zea mays*) y otras hortalizas. En los cultivos establecidos cerca del río Cotaxtla, se tiene el antecedente de que se aplican los plaguicidas del grupo químico de las lactonas macrocíclicas, carbamatos, organofosforados, piretroides y neonicotinoides, en las etapas de plántula, floración y producción (Megchun-García *et al.*, 2017).

Tabla 1. Puntos de muestreo de agua en el río Cotaxtla y Jamapa, en Veracruz, México.

Puntos de muestreo río Cotaxtla	Latitud	Longitud	Puntos de muestreo río Jamapa	Latitud	Longitud
P1	18°48'31.31" N	96°26'33.66" O	P1	19°5'44.17" N	96°6'1.61" O
P2	18°49'30.50" N	96°24'28.27" O	P2	19°5'30.82" N	96°6'6.91" O
P3	18°50'42.24" N	96°22'49.01" O	P3	19°5'32.31" N	96°6'22.55" O
P4	18°51'0.98" N	96°20'41.62" O	P4	19°5'56.38" N	96°6'11.09" O
P5	18°51'26.16" N	96°19'27.28" O	P5	19°5'58.27" N	96°6'30.60" O
P6	18°52'27.02" N	96°18'21.30" O	P6	19°5'35.23" N	96°7'0.71" O
P7	18°53'31.11" N	96°16'56.35" O	P7	19°6'0.98" N	96°6'43.28" O
P8	18°54'15.77" N	96°15'35.10" O			
P9	18°54'54.37" N	96°13'37.23" O			

2.2.2. Toma de muestras

La recolección de las muestras se realizó durante el día en un horario de las 7:00 a las 14:00 h; el muestreo fue el 29 de noviembre del 2017 en el periodo de norte y el 7 de julio del 2018 en el periodo de lluvia, con base en el calendario de predicción de mareas del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE); y de acuerdo con la Norma Mexicana PROY-NMX-AA-121-SCFI-2005 (EPA, 2025). Actualmente, no se reportan estudios del thiamethoxam relacionados con los parámetros fisicoquímicos del agua, por lo que, para este estudio se registró el pH del agua con un potenciómetro calibrado; las muestras de agua tomadas en la temporada de norte registraron un pH promedio de 7.7, y para las muestras tomadas en la temporada de

lluvia, el pH promedio fue de 7.3. En el mes de noviembre del 2017 se registró 43.3 mm de lluvia y en el mes de julio del 2018, se registró 120.6 mm de lluvia (CONAGUA, 2017, 2018).

2.2.3. Tratamiento de las muestras

El agua fue obtenida a una profundidad de 50 cm de la superficie de acuerdo con la Norma Mexicana NMX-AA-014-1980, para cuerpos receptores de agua superficiales. Se utilizó un perfilador CTD (Conductivity – Temperature – Depth) Seabird Term – 19 plus – V2; el instrumento fue programado para obtener datos cada 0.5 m, y a una velocidad de muestreo con intervalos de 2 Hz (0.5 s). Se emplearon contenedores de polietileno de un litro de capacidad, los cuales fueron etiquetados, el volumen de muestra correspondió a 1 L de agua; en el recorrido en lancha se registró un tiempo promedio de 30 minutos entre puntos de muestreo. Las muestras fueron transportadas en contenedores térmicos con una temperatura de 4 ± 1 °C de acuerdo con los protocolos de la NOM-109-SSA1-1994; y trasladadas al Laboratorio de Investigaciones de Recursos Acuáticos (LIRA) del Instituto Tecnológico de Boca del Río, y conservadas en un ultracongelador a una temperatura aproximada de -29 ± 1 °C.

2.2.4. Condiciones de análisis

El análisis para determinar las concentraciones de thiamethoxam en agua se realizó con el uso de un HPLC-UV, Thermo scientific, modelo Finnigan Surveyor (Mohan *et al.*, 2010; Min *et al.*, 2011; Hernández, 2014; Megchun-García *et al.*, 2019; Megchun-García *et al.*, 2024). Se siguió el

siguiente procedimiento para la identificación y cuantificación de thiamethoxam. Se inició con un volumen de muestra inicial de 10 mL, y se adicionó en la fase móvil a la muestra 10 ml de acetonitrilo, AC, (CH_3CN), se dejó reposar por 5 minutos, se agitó con vórtex durante 1 minuto, se agregaron 3 ml de agua HPLC, 6 ml de hexano (C_6H_{14}), 4 g de sulfato de magnesio (MgSO_4), 1 g de N-acetilcisteína (NAC), 500 mg de citrato de sodio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$). Se agitó manualmente durante 20 segundos, y se agitó en vórtex durante 1 minuto; se centrifugó a 500 RPM durante 10 minutos y se tomaron 6 ml de sobrenadante. También, en un tubo II se depositaron 90 mg de sulfato de magnesio (MgSO_4), 150 mg de Amina Primaria Secundaria (PSA), y se agregó 150 mg de Octadecyl Carbon Chain (C18). Se agitó en vórtex durante 1 minuto, se volvió a centrifugar a 500 RPM en 10 minutos, del sobrenadante se tomaron 3 ml para secar a 40 °C con N_2 . Esto implica que el residuo seco se reconstituyó con 200 μL de metanol (CH_3OH), y 100 μL de esta solución, se diluyeron con 900 μL de la fase móvil (factor de dilución 1:10). Se filtró con discos de 0.22 μm y después del pretratamiento se obtuvo un extracto final de 2 ml que se conservaron en viales de color ámbar, de esta cantidad de extracto se inyectó al equipo 20 μL .

2.2.5. Calibración

Las condiciones cromatográficas consistieron en una columna C18 en fase reversa (RP) de 5 μm , mantenida a una temperatura de 25 °C. La fase móvil se constituyó de una mezcla de acetonitrilo (CH_3CN) y agua grado HPLC, sin adición de soluciones amortiguadoras, en una proporción de 45:55 (v/v), operada a un flujo constante de 1 mL min^{-1} ; la detección se realizó a una longitud de onda (λ) de 254 nm. La solución patrón madre

se preparó a una concentración de $1000 \mu\text{g mL}^{-1}$ utilizando metanol como disolvente. A partir de esta, se prepararon cinco soluciones de trabajo con concentraciones de 10, 25, 50, 70 y $100 \mu\text{g L}^{-1}$ para construir la curva de calibración en dicho intervalo lineal, obteniéndose un coeficiente de determinación de $R^2 \geq 0.99$. El límite de detección (LOD) fue de $0.159 \mu\text{g L}^{-1}$ y el límite de cuantificación (LOQ) de $0.482 \mu\text{g L}^{-1}$, con un porcentaje de recuperación promedio de $\geq 90\%$.

La validación del método incluyó repetibilidad ($n=6$, intra-día, $\text{RSD}=3\text{-}8\%$) y reproducibilidad (inter-día, $n=3$ días, $\text{RSD}=5\text{-}12\%$). Para el análisis, cada muestra se conservó en viales ámbar y se inyectó por triplicado (volumen de inyección de $20 \mu\text{L}$), el resultado reportado corresponde al promedio de las inyecciones por triplicado, con una $\text{RSD} \leq 1\text{-}5\%$ (Mohan *et al.*, 2010; Min *et al.*, 2011; Hernández, 2014).

2.3. Análisis estadístico

El análisis estadístico de las variables de estudio consistió en comparar las concentraciones de thiamethoxam, entre el río Cotaxtla y el río Jamapa, después por mes (noviembre y julio). En la variable río, se realizó una prueba de T de Welch para muestras independientes, y en la variable temporada, se efectuó mediante la prueba de T para muestras pareadas; los resultados se presentaron por medio de gráficas de cajas con error estándar. En los puntos de muestreo del río Cotaxtla y el río Jamapa, se aplicó un análisis paramétrico (ANOVA), para conocer si existen diferencias significativas entre medias o grupos y un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis, para comparar en tres o más grupos independientes. Por puntos de muestreo se utilizaron tres repeticiones;

además, se realizó por temporadas en el río Cotaxtla y Jamapa. Se utilizó el software statistica versión 2007.

3. Resultados y discusión

Las concentraciones del thiamethoxam encontradas en los ríos Cotaxtla y Jamapa, de acuerdo con la prueba de T de Welch para muestras independientes, el valor de p ($T \leq t$ dos colas de 0.00117815), el valor de $p < 0.05$, y con un intervalo de confianza del 95%, confirmaron que existen diferencias estadísticas entre los valores de ambos ríos. La desviación estándar para el río Cotaxtla fue de 0.195587, y la desviación estándar para el río Jamapa fue de 0.038205 (Figura 3). Los valores de thiamethoxam encontrados en ambos ríos superan los Límites Máximos de Residualidad (LMR), establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), reportados para invertebrados acuáticos de 0.0175 ppm (LMR); estudios demuestran que la causa es que el thiamethoxam actúa sobre la sinapsis de la acetilcolina de los receptores nicotínicos de los artrópodos (EPA, 2025). Por lo que, para evitar daños a las comunidades de invertebrados, se recomiendan umbrales de ≤ 0.0002 ppm, es decir, para evitar que las concentraciones altas de thiamethoxam en agua provoquen riesgos agudos a corto plazo y un riesgo crónico a largo plazo (Morrissey *et al.*, 2015).

En este estudio se realizaron las cuantificaciones de thiamethoxam en agua superficial del río Cotaxtla con valores altos de 0.24 ppm (Figura 2); en efecto, puede ser causa de los escurrimientos de partículas de suelos y de los procesos de infiltración que tienen origen en el agroecosistema por el uso masivo del thiamethoxam en las diferentes fases del cultivo de los frutales y hortalizas (Megchun-García *et al.*, 2017).

En el municipio de Cotaxtla, se reporta alrededor de 5,984.47 has cosechadas y en el municipio de Jamapa, la superficie cosechada es de alrededor de 1,379.94 has, por lo que la diferencia en superficie en ambos municipios, podría ser el motivo por el cual en el río Jamapa existe una menor concentración de thiamethoxam de 0.13 ppm (SIAP, 2024). Una de las causas de la presencia de thiamethoxam es la velocidad de la degradación, ya que depende en gran medida de la intensidad de la radiación UV local y de la profundidad de la columna de agua, así como de la materia orgánica disuelta, ya que puede actuar como atenuadores o fotosensibilizadores, acelerando o retardando la degradación del thiamethoxam; además, que se puede formar otro metabolito conocido como la clotianidina durante el proceso. Este metabolito pertenece al grupo químico de los neonicotinoide y es más tóxico que el thiamethoxam (Forti *et al.*, 2024). Por otra parte, existe la probabilidad de que el thiamethoxam en agua, se bioacumule en sedimento, y podría ser una fuente secundaria de contaminación a largo plazo con impacto a los invertebrados (Bonmatin *et al.*, 2019).

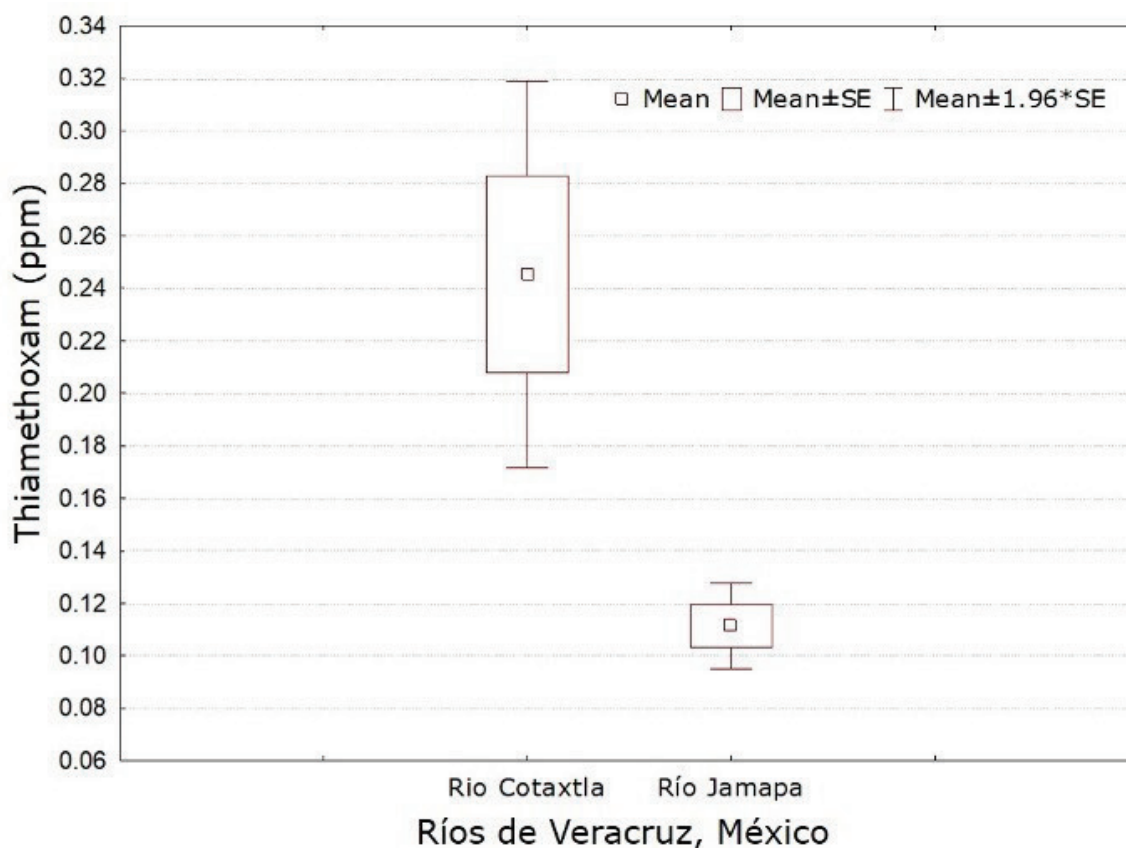


Figura 3. Residualidad del thiamethoxam en agua superficial de la cuenca de los ríos Cotaxtla y Jamapa, Veracruz en México.

Los resultados del thiamethoxam en agua por mes, de acuerdo a la prueba de T de Student, el valor de P ($T \leq t$ dos colas de 0.94375387), y un valor de $\alpha = 0.05$, con un intervalo de confianza del 95%, se encontró que no existe diferencia estadística entre las concentraciones de thiamethoxam en los meses de noviembre 2017 y julio del 2018; asimismo, la desviación estándar para el mes de noviembre del 2017 fue de 0.099744, y la desviación estándar para el mes de julio 2018 fue de 0.078754 (Figura 4). Por otra parte, los valores de thiamethoxam en agua pueden ser causados por la mayor intensidad de la escorrentía de agua,

proveniente de las intensas precipitaciones de agua, presente en el agroecosistema tropical del centro del estado de Veracruz (Sánchez y Hyne, 2014). Los resultados sugieren que el thiamethoxam podría superar los valores de 0.13 ppm en época de intensa lluvia y ciclones que se desarrollan regularmente en los meses de junio a noviembre, y en menor proporción de febrero a mayo de la época de estiaje, en la parte baja de la cuenca de Cotaxtla y Jamapa, ya que los ríos suministran menor volumen de agua hacia el mar del Golfo de México. En la época de norte en Veracruz, en los meses de septiembre a mayo, presenta condiciones climáticas favorables para la contaminación química por el thiamethoxam en aguas superficiales, y también, propician un riesgo potencial de desarrollar residualidad e intoxicación en hojas y frutos de los cultivos hortofrutícolas, con impacto a la salud pública por el consumo y la comercialización de frutas contaminadas de los mercados locales (Hernández-Antonio *et al.*, 2011). Cabe destacar que las concentraciones del thiamethoxam en las muestras tomadas entre los meses de julio de ≥ 0.11 ppm y noviembre de ≥ 0.12 ppm de thiamethoxam, los valores mostraron igualdad estadística (no significativa); es probablemente la causa de la fecha de siembra de los cultivos, la frecuencia, la dosis de aplicación de los neonicotinoides durante el año y de los niveles de precipitación en la zona centro de Veracruz (Figura 4).

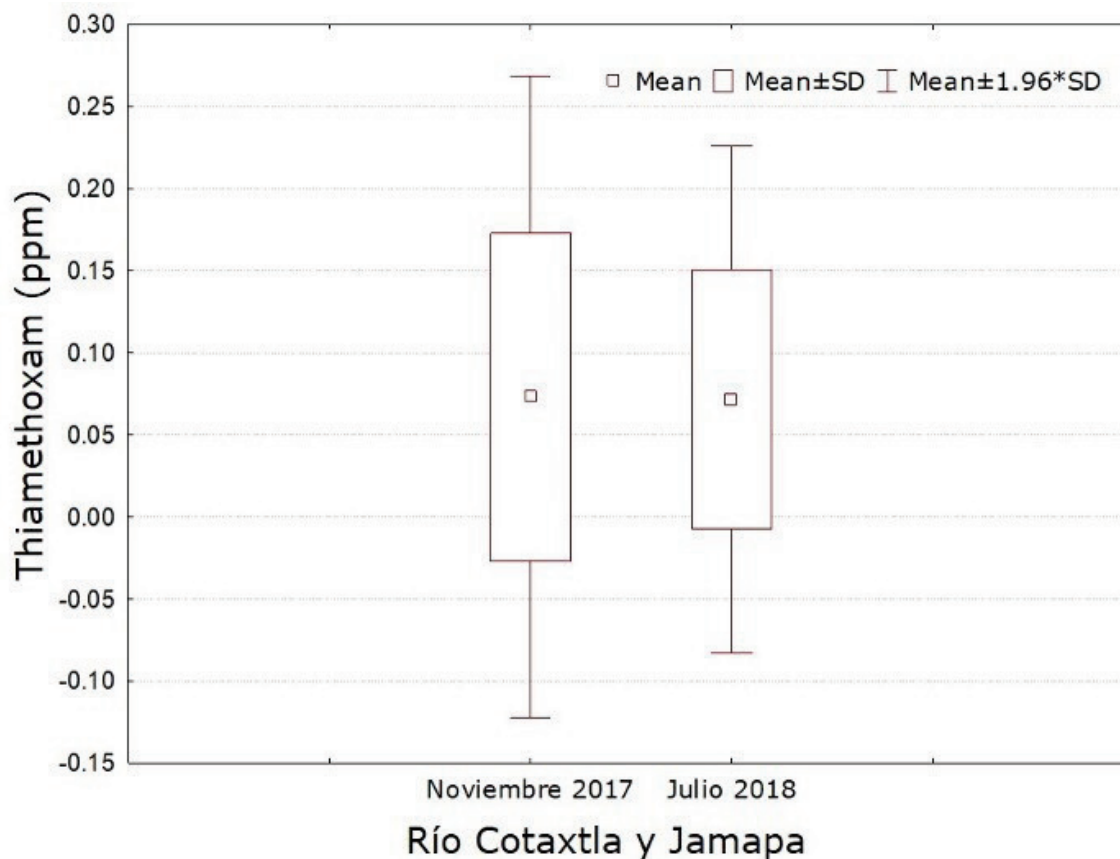


Figura 4. Residualidad del thiamethoxam en los meses de noviembre del 2017 y julio 2018 del río de Cotaxtla, Veracruz.

La contaminación del agua superficial por el thiamethoxam está ligada al tipo de cultivo y al volumen de producción, como por ejemplo el maíz, la sandía, los frutales tropicales, y los diversos problemas provocados por los fenómenos hidrometeorológicos, como lo son las inundaciones y los ciclones en el sector agropecuario (Hladik *et al.*, 2014). En estudios en agua y sedimentos de los humedales, con antecedentes de siembra de cultivos agrícolas: el 36% de las muestras analizadas reportaron la presencia de neonicotinoides en la etapa de primavera en el 2012; las concentraciones incrementaron a un 62% en el verano, y

disminuyeron a un 16% en el otoño, e incrementaron de nuevo a un 91% en la primavera del 2013. Sin embargo, las concentraciones más altas se obtuvieron en verano, cuando inician las precipitaciones (Main *et al.*, 2014). La falta de significancia en los dos meses julio y noviembre ($p \geq 0.05$), se debe a procesos de contaminación difusa y persistencia ambiental que coinciden con estudios a nivel de cuencas tropicales, debido a que no depende únicamente de la escurrentía inmediata post-aplicación de la zona de Cotaxtla y Jamapa, sino de la liberación gradual desde los sedimentos y el flujo base del agua subterránea que alimenta el río (Casado *et al.*, 2019). Además, a pesar de las diferencias entre los regímenes de lluvias entre julio (lluvias) y noviembre (estiaje/nortes), las concentraciones se mantienen similares, indicando que el transporte del metabolito no solo es superficial, sino que proviene de alguna descarga freática contaminada. También, es importante considerar que factores como la turbidez del agua actúan como un filtro solar, reduciendo la penetración de la radiación UV-B, ralentizando su degradación en zonas de Cotaxtla y Jamapa donde el uso del thiamethoxam es de forma extensiva para los cultivos de limón Persa y papaya (Megchun-García *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025).

Se muestrearon nueve sitios en el cauce del río Cotaxtla, presentando diferencias estadísticas significativas (Figura 5). Las concentraciones de los sitios 5 y 6 fueron superiores estadísticamente al resto de las concentraciones de los sitios, con valores de ≥ 0.3 ppm, (F, $p=0.0205$ y KW-H, $p=0.0360$), pero no superiores significativamente a la concentración del sitio 4 de 0.3 ppm (Figura 5).

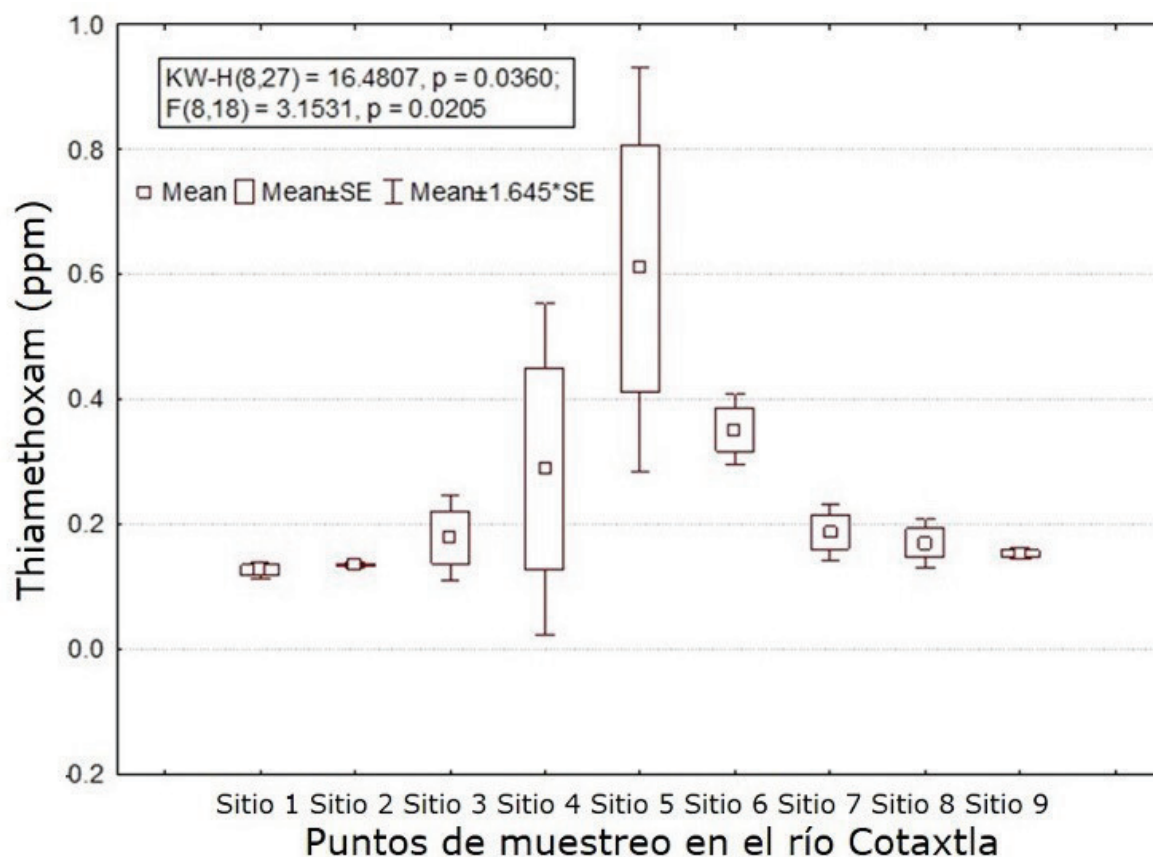


Figura 5. Residualidad del thiamethoxam en diferentes sitios de muestreo del río Cotaxtla, Veracruz. KW-H: $p=0.0360$, F: $p=0.0205$.

La concentración del sitio número 5 es un foco de atención, al sobrepasar el límite máximo de residualidad (0.0175 mg/L) por la EPA (USEPA, 2017). Aunque los neonicotinoides representan menor riesgo a la salud de los humanos, han sido encontrados de manera más frecuente y en concentraciones más altas que los plaguicidas históricamente empleados (Hladik *et al.*, 2014). De ahí que la Comisión Europea en el año 2013 restringiera el uso de tres neonicotinoides, entre ellos el thiamethoxam (Reglamento de Ejecución, 2013).

Para el municipio de Jamapa, de los siete sitios muestreados, los sitios 1, 2, 6 y 7 presentaron valores ≥ 0.12 ppm con diferencias estadísticas significativas, superiores a las concentraciones de thiamethoxam de los sitios de 3, 4 y 5. El sitio muestreado que registró mayor concentración de thiamethoxam fue el "Sitio 2" con una concentración máxima de 0.21 ppm. Aunque, este sitio de muestreo tampoco cumple con la normatividad ambiental internacional, podría tener menor impacto ambiental que los resultados encontrados en Cotaxtla (Figura 6). Actualmente, desde la liberación del thiamethoxam, su uso en los mercados va en aumento; esta clase de xenobióticos es en la actualidad un insecticida de los más vendidos en el mercado global, por lo que, con referencia a lo presentado, son necesarios estudios científicos para minimizar el daño a los ecosistemas acuáticos y los daños a los organismos invertebrados. Las concentraciones de 10 $\mu\text{g/L}$ de thiamethoxam en agua causan la muerte en especies acuáticas (Van der Sluis *et al.*, 2013).

Estudios sobre los neonicotinoides, thiamethoxam y clotianidina en los ecosistemas acuáticos indicaron que existen efectos negativos a nivel individual y poblacional; además, se encontró que el efecto se extiende al zooplancton, las comunidades bentónicas y neustons (Basley y Goulson, 2018). Entre las especies de invertebrados presentes en agua del río Cotaxtla y Jamapa se encuentran camarón de agua dulce (*Gastropoda*, *Physidae*, *Lymnaeidae*), cangrejo violinista (*Uca vocator*), almeja de agua dulce, Bivaldos (*Sphaeriidae*); estos podrían verse afectados por la presencia de agua contaminada con thiamethoxam, debido a que se ha observado que el metabolito retrasa el desarrollo de las larvas (Basley y Goulson, 2018). En un estudio sobre los efectos del thiamethoxam en invertebrados en agua dulce, se encontró una respuesta de inmovilidad y

mortalidad del 10%; entre los crustáceos se observó una amplia gama de sensibilidades al thiamethoxam y baja toxicidad para los dáfnidos (*D. magna* y *Daphnia pulex*). En pruebas agudas en copépodos, se observó con valores estimados de CE50 (concentración efectiva media) de thiamethoxam superiores a 100 mg/L (Finnegan *et al.*, 2017).

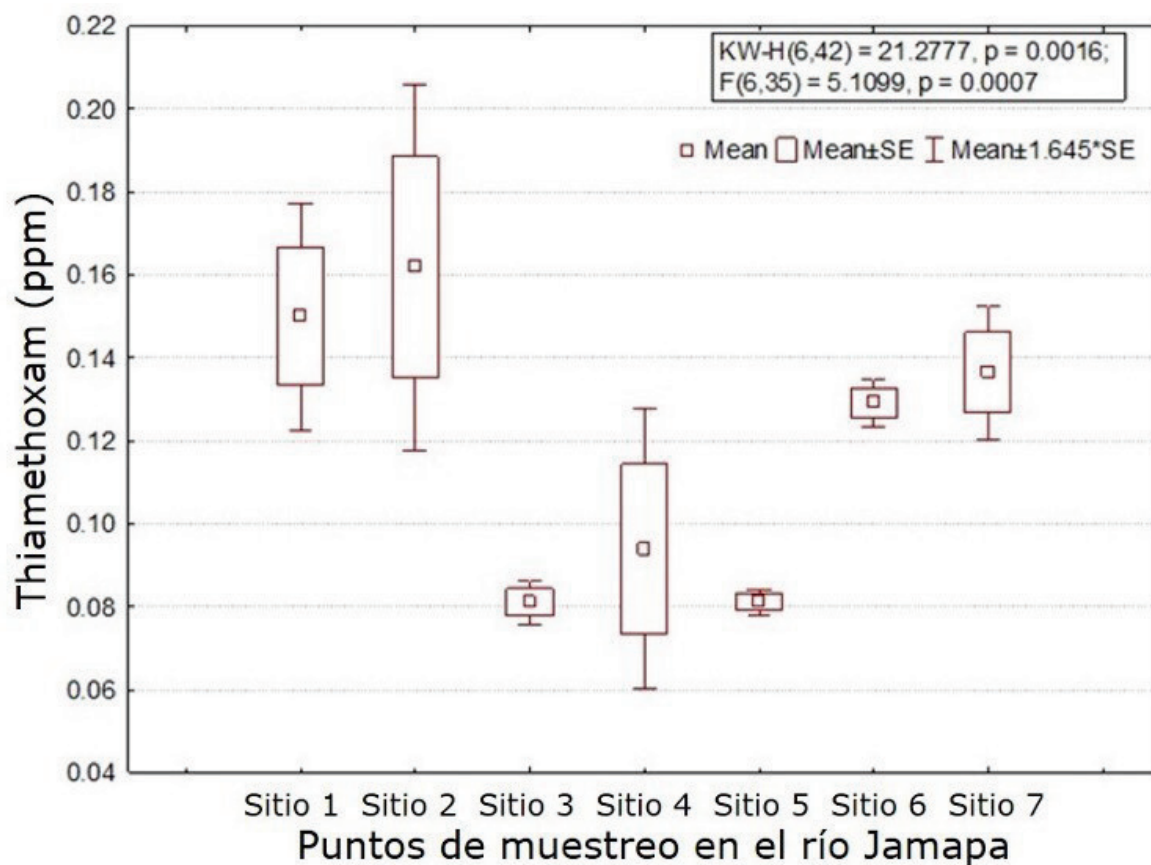


Figura 6. Residualidad del thiamethoxam en diferentes sitios de muestreo del río Jamapa, Veracruz. KW-H: $p=0.0016$, F: $p=0.0007$.

Con base en los resultados generados en el siguiente esquema de la movilidad del thiamethoxam (Figura 7), se infiere que en las zonas agrícolas establecidas en la zona centro de Veracruz, México, el manejo

del insecticida thiamethoxam en los cultivos, genera la residualidad del thiamethoxam, por las características químicas de su alta movilidad, principalmente cuando es transportado por el agua a través de los procesos de escorrentía, evotranspiración, lixiviación, y su participación en el ciclo hidrológico del agua (Anderson *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2025). En climas tropicales con altas temperaturas el thiamethoxam se dispersa rápidamente contaminando suelos fuera del área de aplicación; el diagrama destaca la adsorción en la capa arable y la lixiviación al agua subterránea, la cual actúa como reservorio para los ríos superficiales de la zona centro de Veracruz (Kruisdijk *et al.*, 2022). Dado que el thiamethoxam es altamente hidrofílico, se transporta en fase disuelta, y el transporte es asociado más en cuencas con pendientes pronunciadas y eventos de lluvia torrenciales (Tudi *et al.*, 2021).

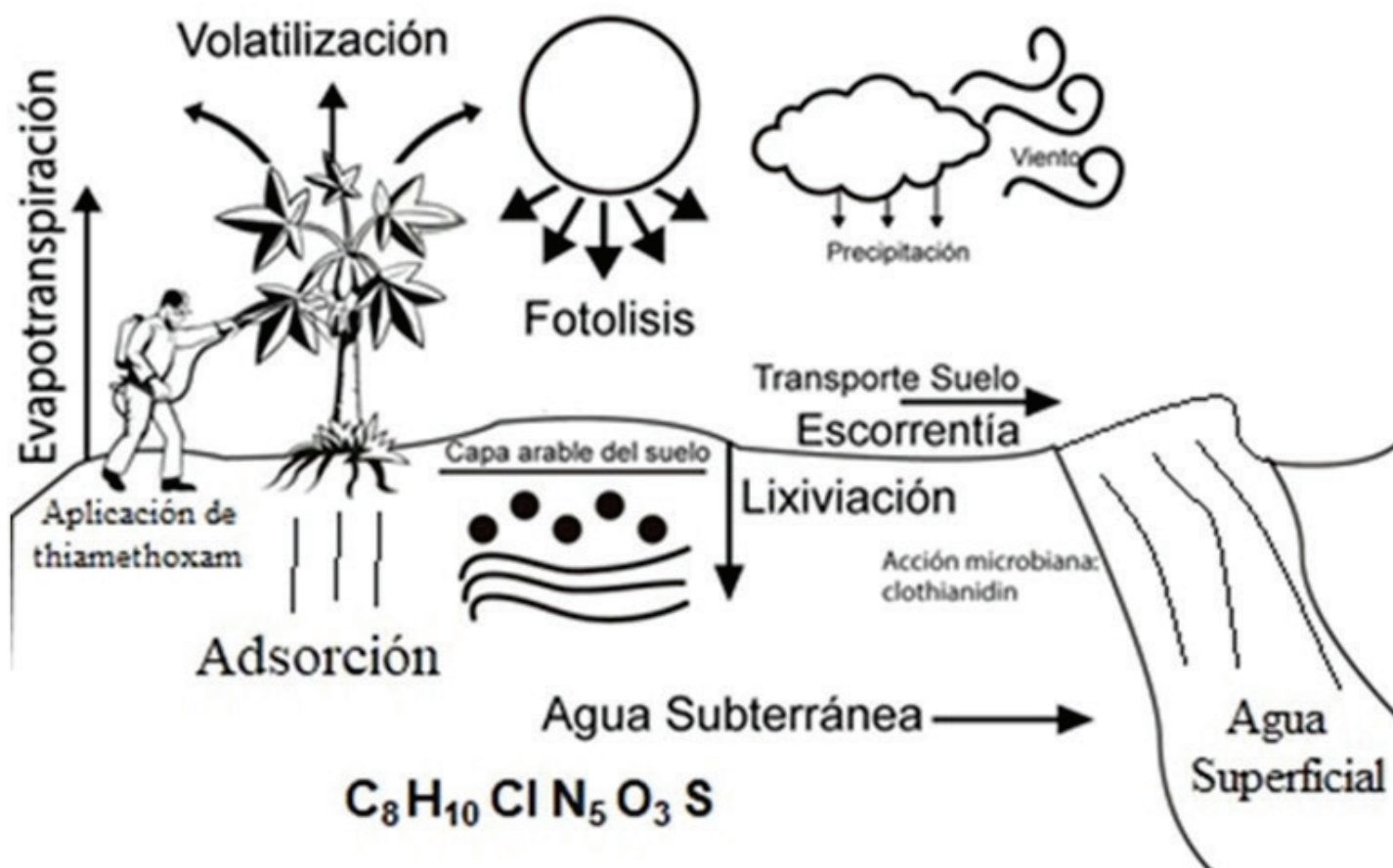


Figura 7. Movilidad del thiamethoxam en los diferentes ambientes, agua, suelo y aire.

En la Figura 8 se observan las concentraciones del thiamethoxam promedio por temporada de muestreo; en la gráfica los valores altos fueron más en la época de lluvia para el río Cotaxtla, y el río Jamapa presentó valores bajos en las dos temporadas. La variabilidad de las concentraciones de thiamethoxam pudiera ser influenciada por los escurrimientos y por los patrones de precipitación que ocurren en el estado de Veracruz, dado que en el año 2017 se registró mayor precipitación anual de 1,730.9 mm, en comparación con el año 2018, que

se registró una precipitación anual de 1,516.1 mm (CONAGUA, 2017, 2018). Investigaciones sobre la movilidad de los plaguicidas, indican que las precipitaciones intensas incrementan la movilidad de los plaguicidas desde el suelo hacia los cuerpos de agua (Li *et al.*, 2017).

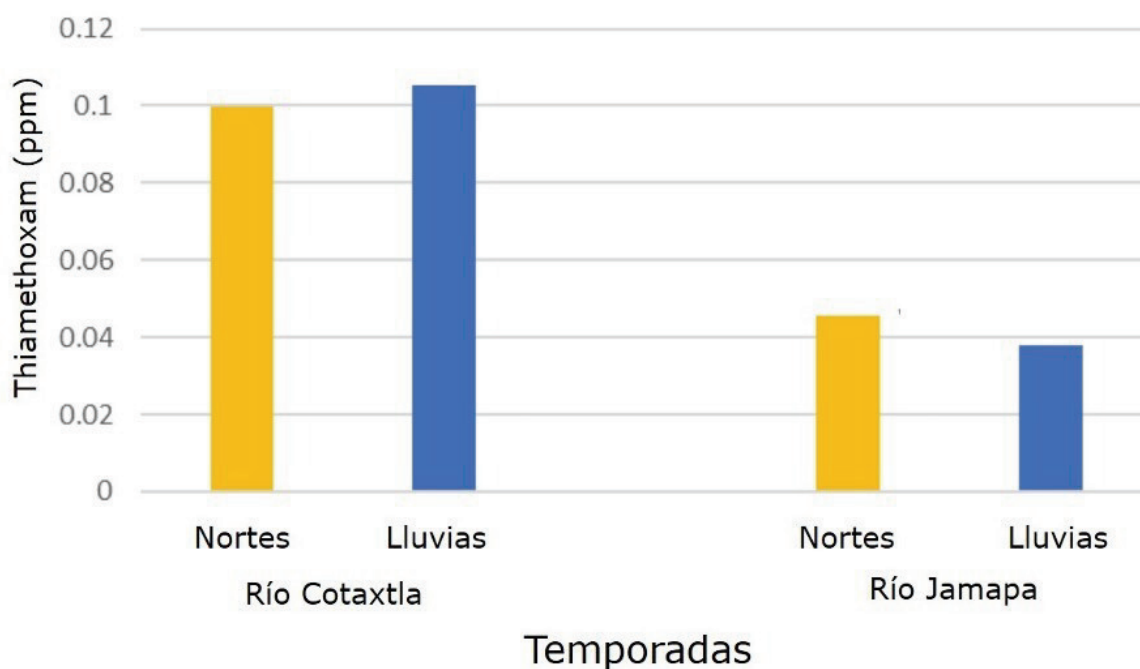


Figura 8. Concentración promedio de thiamethoxam en los ríos Cotaxtla y Jamapa en las temporadas de nortes y lluvias.

4. Conclusiones

El nivel más alto de thiamethoxam encontrado corresponde a 0.6 ppm en el "Sitio 5" de la cuenca del río Cotaxtla, esta cantidad supera el límite máximo de residualidad (LMR) establecido por la EPA (USEPA, 2017) de 0.0175 ppm, por lo cual representa un riesgo agudo para invertebrados. La mayor concentración se encontró en el cauce del río Cotaxtla con valor

de ≥ 0.24 ppm de thiamethoxam. Al comparar las concentraciones por mes, se puede ver que noviembre es donde se presentan los valores más altos de ≥ 0.12 ppm de thiamethoxam.

5. Agradecimientos

Al Instituto Tecnológico de Boca del Río, por la disposición y el apoyo con el equipo HPLC-UV, Thermo scientific, modelo Finnigan Surveyor del laboratorio LIRA (Laboratorio de Recursos Acuáticos).

6. Financiamiento

Convocatoria de apoyo a la investigación científica y tecnológica 2017, del Tecnológico Nacional de México.

7. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaramos no tener conflicto de interés

8. Declaración del uso de IA

No se utilizó IA en ninguna de las etapas de la escritura del artículo.

9. Referencias

Anderson, J. C., Dubetz, C., & Palace, V. P. (2015). Neonicotinoids in the Canadian aquatic environment: A literature review on current use products with a focus on fate, exposure, and biological effects. *Science of the Total Environment*, 505, 409–422. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.090>

- Anderson, T., Salice, C., Erickson, R., McMurry, S., Cox, S., & Smith, L. (2013). Effects of landuse and precipitation on pesticides and water quality in playa lakes of the southern high plains. *Chemosphere*, 92(1), 84–90. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.054>
- Basley, K., & Goulson, D. (2018). Neonicotinoids thiamethoxam and clothianidin adversely affect the colonisation of invertebrate populations in aquatic microcosms. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 9593–9599. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-1125-5>
- Bonmatin, J. M., Noome, D. A., Moreno, H., Mitchell, E. A. D., Glauser, G., Soumana, O., Van Lexmond, M. B. V., & Sanchez-Bayo, F. (2019). A survey and risk assessment of neonicotinoids in water, soil and sediments of Belize. *Environmental Pollution*, 249, 949–958. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.099>
- Casado, J., Brigden, K., Santillo, D., & Johnston, D. (2019). Screening of pesticides and veterinary drugs in small streams in the European Union by liquid chromatography high resolution mass spectrometry. *Science of The Total Environment*, 670, 1204–1225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.207>
- Castañeda-Chávez, M. R., Lango-Reynoso, F., & Navarrete-Rodríguez, G. (2018). Hexachlorocyclohexanes, cyclodiene, methoxychlor, and heptachlor in sediment of the Alvarado Lagoon system in Veracruz, Mexico. *Sustainability*, 10(1), 76. <https://doi.org/10.3390/su10010076>

- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua & Servicio Meteorológico Nacional. (2017, 2018). Resúmenes mensuales de lluvia y temperatura 2017 y 2018. CONAGUA. <https://smn.conagua.gob.mx/>
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2011). Estadísticas del agua en México, edición 2011. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/259373/_2011_EAM2011.pdf
- Ebanks-Mongalo, B. F., Suárez-Sánchez. J., Siu-Estrada, E., Montoya-Arguello, J. J., Mairena-Valdivia, D. A., Flores-Pacheco A., Van der Wal, J. C., y Valencia-Quintana, P. (2013). Concentración de plaguicidas en agua, sedimentos y ostiones (*Crassostrea rizophorae*) de la Laguna de Bluefields, RAAS, Nicaragua. *Wani*, 67, 49–54. <https://doi.org/10.5377/wani.v67i0.1889>
- EFSA, European Food Safety Authority. (2018). Peer review of the pesticide risk assessment for the active substance thiamethoxam considering the uses as seed treatments and granules. *EFSA Journal*, 16(2), 5179. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5179>
- EPA, Environment Protection Authority Victoria (2025). *Sampling and analysis of waters, wastewaters, soils and wastes*. <https://www.epa.vic.gov.au/sampling-and-analysis-waters-wastewaters-soils-and-wastes>
- Finnegan, M. C., Baxter, L. R., Maul J. D., Hanson M. L., Hoekstra, P. F. (2017). Comprehensive characterization of the acute and chronic toxicity of the neonicotinoid insecticide thiamethoxam to a suite of aquatic primary producers, invertebrates, and fish. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 36(10), 2838–2848. <https://doi.org/10.1002/etc.3846>

- Forti, J. C., Robles, P. E. M., Tadayozzi, Y. S., Demori, M. A. F., Santos, F. A., Putti, F. F., & Vicente, E. F. (2024). Electrochemical processes used to degrade thiamethoxam in water and toxicity analyses in non-target organisms. *Processes*, 12(5), 887. <https://doi.org/10.3390/pr12050887>
- Hernández, D. D. (2014). *Determinación de tiamethoxam, clotianidina e imidacloprida y metabolitos en miel* [Tesis de grado, Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6345>
- Hernández-Antonio, A. & Hansen, A. M. (2011). Uso de plaguicidas en dos zonas agrícolas de México y evaluación de la contaminación de agua y sedimentos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 27(2), 115–127. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992011000200003&lng=es&tlng=es
- Hernández-Castellanos, J. L., Cuervo-González, R., Montañez-Soto J. L., Hernández-Castellanos, N. D., Pérez-Vargas, M. A., Cruz-Hernández, A., y Chairez-Martinez, L. (2021). Biodegradación de plaguicidas organofosforados y organoclorados por *Candida tropicalis* y *Stenotrophomonas maltophilia* en microcosmos del suelo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37, 553–564. <https://doi.org/10.20937/RICA.53889>
- Hladik, M. L., Kolpin, D. W., & Kuivila, K. M. (2014). Widespread occurrence of neonicotinoid insecticides in streams in a high corn and soybean producing region, USA. *Environmental Pollution*, 193, 189–196. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.06.033>

- INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2026). *Información geográfica, medio ambiente, ordenamiento territorial y urbano*. <https://www.inegi.org.mx/programas/hidro/#descargas>
- ISO, International Organization for Standardization. (2020). *Water quality—Sampling—Part 10: Guidance on sampling of waste water* (ISO Standard No. 5667-10:2020). <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/09/70934.html>
- Kruisdijk, E., Zietzschmann, F., Stuyfzand, P. J., & Van Breukelen, B. M. (2022). Intra aquifer variations in pesticide sorption during a field injection experiment. *Journal of Contaminant Hydrology*, 248, 104015. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2022.104015>
- Li, C., Chen, Q., Zhang, X., Snyder, S. A., Gong, Z., & Lam, S. H. (2017). An integrated approach with the zebrafish model for biomonitoring of municipal wastewater effluent and receiving waters. *Water Research*, 131, 33–44. DOI: 10.1016/j.watres.2017.12.017
- Li, M.-J., He, Q.-B., Wu, Y.-F., Gao, Q., Wang, A.-L., Xiao, J.-J., Liao, M., Huang, Y., Wang, Y.-H., & Cao, H.-Q. (2025). Systemic Assessment of Chronic Toxicity of Thiamethoxam on Honeybees (*Apis mellifera*). *Insects*, 16(9), 936. <https://doi.org/10.3390/insects16090936>
- Main, A. R., Headley, J. V., Peru, K. M., Michel, N. L., Cessna, A. J., Morrissey, C. A. (2014). Widespread use and frequent detection of neonicotinoid insecticides in wetlands of Canada's prairie pothole region. *PLoS ONE*, 9(3), e92821. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092821>

- Megchún-García, J. V., Rodríguez-Lagunes, D. A., Castañeda-Chávez, M. R., Murguía-García, J., Lango-Reynoso, F., Leyva-Ovalle, O. R. (2017). Thiamethoxam in papaya (*Carica papaya* Linnaeus) agroecosystems. *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 2(2), 874–880. <http://dx.doi.org/10.22161/ijeab/2.2.40>
- Megchún-García, J. V., Castañeda-Chávez, M. R., Rodríguez-Lagunes, D. A., Murguía-González, J., Lango-Reynoso, F., Leyva-Ovalle, O. R. (2019). Impact of thiamethoxam in papaya cultivation (*Carica papaya* L.) in rotation with watermelon (*Citrullus lanatus*) crops. *Agriculture*, 9(6), 129. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060129>
- Megchún-García, J. V., Castañeda-Chávez, M. R., Rodríguez-Lagunes, D. A., Lango-Reynoso, F., Amaro-Espejo, I. A. (2024). Thiamethoxam residuality in papaya plant and fruit (*Carica papaya* Linnaeus) cultivated in rotation with watermelon (*Citrullus lanatus*). *Enfoque UTE*, 15(3), 18–24. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.1037>
- Min, Z. W., Lee, J. Y., Son, K., Im, G., & Hong, S. (2011). Development and validation of a quick easy cheap effective rugged and safe-based multi-residues analysis method for persimmon, grape and pear using liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 54, 771–777. <https://doi.org/10.1007/BF03253158>
- Mohan, C., Kumar, Y., Madan, J., & Saxena, N. (2010). Multiresidue analysis of neonicotinoids by solid-phase extraction technique using high-performance liquid chromatography. *Environmental Monitoring and Assessment*, 165, 573–576. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0968-8>

- Morrissey, C. A., Mineau, P., Devries, J. H., Sanchez-Bayo, F., Liess, M., Cavallaro, M. C., & Liber, K. (2015). Neonicotinoid contamination of global surface waters and associated risk to aquatic invertebrates: A review. *Environment International*, 74, 291–303. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.024>
- Neov, B., Georgieva, A., Shumkova, R., Radoslavov, G., & Hristov, P. (2019). Biotic and Abiotic Factors Associated with Colonies Mortalities of Managed Honey Bee (*Apis mellifera*). *Diversity*, 11(12), 237. <https://doi.org/10.3390/d11120237>
- Palomarez-García, J. M. (2010). *Valoración de la calidad de los influentes y efluentes de las granjas acuícolas de la cuenca baja del río Jamapa, Veracruz* [Tesis de doctorado, Colegio de Postgraduados]. <http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/handle/10521/436>
- Pereyra, D., Pérez, J. A., & Salas, M. R. (2010). Hidrología. En *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz*. (Tomo I: Patrimonio Natural, pp. 85–122). Gobierno del Estado de Veracruz; Universidad Veracruzana.
- Reglamento de Ejecución (UE) N.º 485/2013 de la Comisión, de 24 de mayo de 2013, por el que se modifica el Reglamento de Ejecución (UE) N.º 540/2011 en lo que respecta a las condiciones de aprobación de las sustancias activas clotianidina, tiametoxam e imidacloprid, y se prohíbe el uso y la venta de semillas tratadas con productos fitosanitarios que contengan dichas sustancias activas. (2013). Diario Oficial de la Unión Europea, L 139, 12–26. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32013R0485>

- Sánchez, F., y Hyne, R. V. (2014). Detection and analysis of neonicotinoids in river waters: Development of a passive sampler for three commonly used insecticides. *Chemosphere*, 99, 143–151. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.10.051>
- Sánchez-Alarcón, J., Milic, M., Kašuba, V., Tenorio-Arvide, M. G., Montiel-González, J. M. R., Bonassi, S., & Valencia-Quintana, R. (2021). A Systematic Review of Studies on Genotoxicity and Related Biomarkers in Populations Exposed to Pesticides in Mexico. *Toxics*, 9(11), 272. <https://doi.org/10.3390/toxics9110272>
- Secretaria de comercio y fomento industrial. (1980). Aguas residuales y muestreo (NMX-AA-003-1980). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166762/NMX-AA-003-1980.pdf>
- Secretaria de comercio y fomento industrial. (1980). Cuerpos receptores- Muestreo (NMX-AA-014-1980). <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166769/NMX-AA-014-1980.pdf>
- Secretaria de comercio y fomento industrial. (1988). Plaguicidas: Determinación de residuos en agua: Método de toma de muestras. Diario Oficial de la Federación (NOM-AA-104-1988). <https://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa104.pdf>
- Secretaria de la salud (1994). Proyecto norma oficial mexicana, bienes y servicios: Procedimientos para la toma, manejo y transporte de muestras de alimentos para su análisis microbiológico (NOM-109-SSA1-1994). Diario Oficial de la Federación. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ssa1/ssa1109p.pdf>

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2017). Plan de acción de manejo integral de la cuenca del río Jamapa. SEMARNAT.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2024). *Avance agrícola*. https://nube.agricultura.gob.mx/avance_agricola/
- Soares, D. A., Lupatini, G. C., Sekiya, B. M. S., Mateus, G. P., Andrichetto, C., Modesto, V. C., Da Silva, J. R., Silva de la Cruz, J. H., Galindo, F. S., Crusciol, C. A. C., Pavinato, P. S., & Andreotti, M. (2024). Integrated crop–livestock systems as a strategy for sustainable maize and soybean production in tropical sandy soils. *Agronomy*, 14(9), 2071. <https://doi.org/10.3390/agronomy14092071>
- Tang, F. H. M., Lenzen, M., McBratney, A., & Maggi, F. (2021). Risk of pesticide pollution at the global scale. *Nature Geoscience*, 14, 206–210 . <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00712-5>
- Tomasini-Ortiz, A. C., Bravo-Inclán, L. A., Sánchez-Chávez, J., & Moeller-Chavez, G. E. (2016). Monitoreo de descargas de aguas residuales y su impacto en el lago de Pátzcuaro, México (2006-2011). *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales*, 9(1), 61–74.
- Tudi, M., Ruan, H. D., Wang, L., Lyu, J., Sadler, R., Connell, D., Chu, C., & Phung, D. T. (2021). Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1112. <https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>
- UNEP, United Nations Environment Programme. (2016). *A snapshot of the world's water quality: Towards a global assessment*. UNEP. https://wesr.unep.org/media/docs/assessments/unep_wwqa_report_web.pdf

- University of Hertfordshire. (2026). *Thiamethoxam report*.
<https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/631.htm>
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. (2017). *Aquatic life benchmarks and ecological risk assessments for registered pesticides*. <https://www.epa.gov/pesticide-science-and-assessing-pesticide-risks/aquatic-life-benchmarks-and-ecological-risk>
- Van der Sluijs, J. P., Simón-Delso, N., Goulson, D., Maxim, L., Bonmatin, J. M., & Belzunces, L. P. (2013). Neonicotinoids, bee disorders and the sustainability of pollinator services. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5(3-4), 293–305.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.05.007>
- Zhang, X., Shi, S., Jiang, J., Liu, H., Hong, W., Li, M., Guo, L., Zhou, X., Ye, C., Wu, H., & Luo, H. (2025). Neonicotinoid insecticides in the Qiantang River: Occurrence, sources, and ecological risks for sustainable water resources. *Sustainability*, 17(2), 697.
<https://doi.org/10.3390/su17020697>