

Capítulo 2.2

Biomarcadores ambientales y vulnerabilidad en la Presa La Rucia de Tonalá, Jalisco

González Ornelas Perla Patricia¹

García García Edith Xio Mara²

Fausto Roberto Méndez de La Cruz³

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20259457>



¹ Profesora del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: perla.gonzalez6321@academicos.udg.mx

² Profesora-Investigadora del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: xio.garcia@academicos.udg.mx

³ Profesor-Investigador de la Universidad Nacional Autónoma de México. e-mail: faustor@ib.unam.mx

1. Introducción

En México, se experimenta una serie de problemas de índole ambiental que comprometen su desarrollo sostenible. Asimismo, algunos problemas son isomorfos a los que también experimentan países del primer mundo, relacionados con los procesos de industrialización y urbanización que se han acelerado en los últimos años. No obstante, otro tipo de problemas son característicos de los países en vías de desarrollo, y están asociados a la transformación del hábitat y la sobreexplotación de los recursos naturales (Sánchez-Bayo et al., 2013).

En este contexto, es posible afirmar que diversos eventos antrópicos han ocasionado transformaciones reversibles, cuasirreversibles e irreversibles *in situ*, que han afectado física y químicamente la composición de ríos, arroyos y cuerpos de agua en lo general. Es decir, la sustitución de vegetación y artificialización del suelo terminan aniquilando la flora y fauna nativas, y provocan una disminución de la cantidad de especies y una reducción de la calidad de los cuerpos de agua (Mateo-Sagasta et al., 2017). En este sentido, las actividades de índole agropecuario, la extracción, tratamiento y distribución del agua para consumo humano, la ocupación urbano-habitacional y los cambios de usos del suelo, entre otras actividades de índole fabril, producen residuos contaminantes que son vertidos con poco o nulo tratamiento en los cuerpos de agua receptores (Soto-Cortés, 2016).

Los habitantes del municipio de Tonalá, Jalisco, en México, desarrollan actividades agrícolas de una gran variedad de cultivos (SAGARPA, 2004), utilizando compuestos químicos peligrosos para la salud de los organismos nativos, así como del humano. Uno de esos compuestos nocivos es el dimetoato, de la familia de los organofosforados, que son arrastrados por escurrimientos a cuerpos de agua lénticos (FAO, 2021; Palma et al., 2009). A estas actividades, muy comunes en la región, se asocian cuerpos de agua temporales formados en las depresiones del

terreno, denominados humedales de temporal, que son embalses que pueden verse afectados por el ingreso de contaminantes usados en la zona. Sin embargo, dichos cuerpos de agua son sitios de reproducción de anfibios y otros organismos acuáticos (Palma et al., 2009). No obstante, estos organismos ocupan diversos hábitats espacial y temporalmente, pero dependen de estos lugares para reproducirse (Albarca y Herzig, 2002). Considerando que los anfibios son organismos sensibles a los contaminantes ambientales (Blaustein et al., 1994), se ha considerado que son indicadores de la calidad ambiental (Wake y Vredenburg, 2008).

Para este estudio se realizó una colecta de muestras de huevos de dos especies de anfibios, para ser utilizados como biomarcadores ambientales. Concretamente, las especies *Dryophytes eximius* (Olvera-Mendoza et al., 2023) y *Spea multiplicata* (Farr et al., 2010), las cuales se encuentran comúnmente en cuerpos de agua y están bien representadas en el centro y norte de México (Méndez de la Cruz et al., 2009).

El desarrollo larval de estos anfibios coincide en que la mitad de su ciclo de vida se cumple en ambientes acuáticos y el resto en ambientes terrestres. De ahí, se determinó que en estados larvales estas especies presentan una alta susceptibilidad y vulnerabilidad al cambio climático global (Pounds, 2005). Por ello, en este estudio se propone determinar la supervivencia de expuestos a diferentes concentraciones de diversos contaminantes.

En función de lo anterior, y a partir de bioensayos en laboratorio y extrapolación de efectos ocasionados por exposiciones ante agentes químicos, se determinó que resulta de gran importancia realizar estudios con poblaciones nativas de anfibios, utilizándolos como bioindicadores ambientales bajo condiciones cambiantes. Estos modelos son vitales para estudios ecotoxicológicos que sirvan como biomarcadores ambientales e indicadores de la salud y calidad del cuerpo de agua. Los anfibios nativos son organismos modelo para determinar la calidad del agua, ya que su sobrevivencia se ve afectada, aun a bajos niveles de contaminantes, por lo que pueden considerarse bioindicadores de la calidad de los cuerpos de agua.

2. Metodología

La metodología se indica en la Tabla 1 y la zona de estudio en la Figura 1.

Tabla 1
Fases del estudio

1. Ubicación del estudio			
Microcuenca El Ahogado (Tonalá, Jalisco):			
• Coordenadas: 20°32' latitud norte, 103°18' longitud oeste. • Altitud: 1200–1700 m s. n. m. • Colindancias: Municipios de Guadalajara, Zapotlanejo, Juanacatlán, El Salto y Tlaquepaque. • Superficie: 0.21 % del estado de Jalisco. • Cuerpo de agua: Presa La Rucia.			
2. Muestreo y recolección			
• Periodo: Junio y agosto de 2019. • Objetivo: Identificación de especies en el cuerpo de agua y estudio de huevos de anfibios. • Proceso: ◦ Recolección de huevos durante el estado reproductivo en la periferia del humedal. ◦ Cultivo en peceras durante 2 meses para observación del desarrollo larval. ◦ Análisis del estadio larval (basado en González-Ornelas, 2004).			
3. Especies estudiadas			
Especie	Nombre Común	Tamaño	Características
<i>Dryophytes eximius</i>	Ranita verde	3.5–4.0 cm (ambos sexos)	Cabeza triangular, discos adhesivos en patas.
<i>Spea multiplicata</i>	Sapo (Southern Spadefoot)	Machos: 4.7 cm; Hembras: 5.5 cm	Tamaño mediano, adaptación a ambientes áridos.

4. Diseño experimental

- Variables:
 - Variable de respuesta: Índice de mortandad por especie.
 - Factor: Contaminante organofosforado Dimetoato (0,0-Dimetil-S-N-metilcarbamoilometilo fosforo-ditioato).
 - Niveles:
 - Control (0 concentración).
 - Dos niveles de dosis del contaminante (0Ug, 0.2Ug, 0.25Ug)
 - Réplicas: 4 individuos por nivel y especie.
 - Organismos por condición: 20 ejemplares por pecera.
-

5. Condiciones controladas

- Parámetros fisicoquímicos:
 - Temperatura: 20 °C.
 - Fotoperiodo: 14 horas luz / 10 horas oscuridad.
-

6. Análisis estadístico

- Objetivo: Determinar ecuaciones de sensibilidad al contaminante
 - Métodos:
 - Correlación (tipo y fuerza mediante (r²)).
 - Regresión para modelar la relación entre dosis y mortandad.
 - Validación:
 - Intervalo de confianza del 95 % ($p < 0.05$).
 - Diseño factorial con dos factores independientes (sin interacción).
 - El diseño experimental es cuantitativo porque se basa en la medición numérica y el análisis estadístico para probar hipótesis. Su objetivo es identificar relaciones de causa-efecto entre variables mediante la manipulación controlada de una variable independiente y la observación de su impacto en una variable dependiente, utilizando datos estructurados y replicables.
-

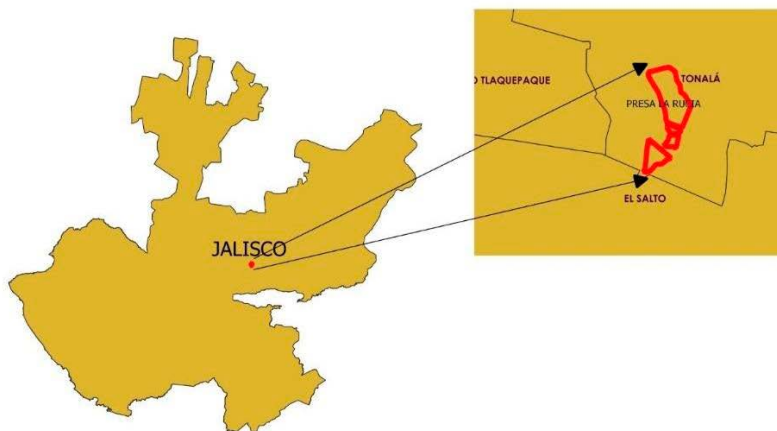
7. Objetivo principal

Determinar ecuaciones que expliquen la sensibilidad de las especies a diferentes niveles de Dimetoato, mediante modelos estadísticos validados.

Fuente: González-Ornelas, 2016.

Figura 1

Delimitación de la Presa La Rucia en la Cuenca de El Ahogado, Tonalá, Jalisco



Fuente: González-Ornelas, 2016.

3. Resultados

La supervivencia contra la concentración de organofosforados de las dos especies: Valor de sobrevivencia organofosforado de las dos especies: índice de supervivencia para este estudio comparando las dos especies (*Dryophytes eximius* y *Spea multiplicata*) contra el nivel de concentración de organofosforados (OP) (Figura 2).

Figura 2

Supervivencia en diferentes dosis de exposición para ambas especies.

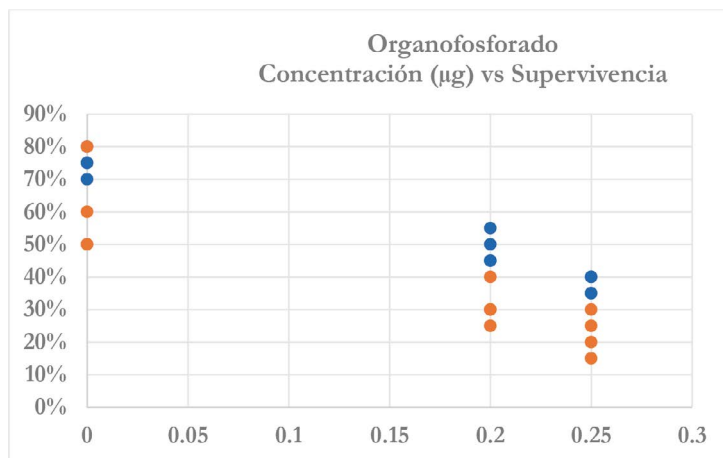


Fuente: González-Ornelas, 2016.

Análisis de supervivencia especies utilizadas (*Dryophytes eximius* y *Spea multiplicata*) (Figura 3).

Figura 3

Supervivencia de Dryophytes eximius y Spea multiplicata en función del nivel de concentración de Organofosforados Dimetoato.



Naranja: *Dryophytes eximius*

Azul: *Spea multiplicata*

Fuente: González-Ornelas, 2016.

Ambas especies (*Dryophytes eximius* y *Spea multiplicata*) presentan una correlación negativa en supervivencia con la concentración del organofosforado dimetoato. Los datos marcan una clara relación: esto es, a mayor nivel de OP, menor supervivencia. El índice de regresión nos muestra un valor $r^2 = 91.4$, lo cual significa que la ecuación mostrada explica el 91.4 % del comportamiento, lo cual es muy aceptable.

Los valores de P, tanto para los componentes de la ecuación como para el modelo (análisis de varianza), son menores a 0.05, por lo que se consideran estadísticamente significativos y válidos para explicar la supervivencia (Tabla 2).

Tabla 2
Índice de supervivencia (*Dryophytes eximius*). Organofosforado

Predictores	Coefficientes	Error cuadrático	Valor de T	Valor de P
Constante	0.73036	0.02834	25.77	0.000
OP (µg)	-0.00005141	0.00000481	-10-68	0.000

Fuente: González-Ornelas, 2016.

Basados en el valor de P obtenido en el análisis, podemos concluir que los componentes de la ecuación son estadísticamente válidos ($P < 0.05$). Valor estándar $S = 0.0652141$, R cuadrada $R-Sq = 91.9 \%$, R cuadrada ajustada $R-Sq (adj) = 91.1 \%$. Los resultados del análisis de varianza y el valor de P obtenido nos confirman que la ecuación de regresión es estadísticamente válida ($P < 0.05$) (Tabla 3). Asimismo, solo en el orden de los residuos se encontró una varianza alta, la cual, al no repetirse en el resto de los grupos, se considera no representativa.

Tabla 3
Análisis de Varianza (*Dryophytes eximius*)

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor de P
Regresión	1	0.48476	0.48476	113.98	0.000
Error residual	10	0.04253	0.00425		
Total	11	0.52729			

Fuente: González-Ornelas, 2016.

Análisis de regresión del índice de supervivencia de la especie *Spea multiplicata*, comparada con la concentración de acetato de plomo (Tabla 4).

Tabla 4*Análisis de regresión índice de supervivencia de (S. multiplicata) vs Dimetoato.*

Predictores	Coeficientes	Error cuadrático	Valor de T	Valor de P
Constante	1	0.0.820051	34.57	0.000
Pb (µg)	1	0.197865	45.23	0.000

Fuente: González-Ornelas, 2016.

Los componentes de la ecuación son estadísticamente válidos ($P < 0.05$). Valor estándar $S = 0.0661438$ R cuadrada $R\text{-Sq} = 96.3 \%$ R cuadrada ajustada $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 95.4 \%$ (Tabla 5).

Tabla 5*Análisis de Varianza para (Spea multiplicata).*

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F	Valor de P
Regresión	2	1.01792	0.508958	116.33	0.000
Error residual	9	0.03938	0.004375		
Total	11	1.05729			

Fuente: González-Ornelas, 2016.

La ecuación de regresión es estadísticamente válida ($P < 0.05$). La validación de supuestos de la regresión para *Spea multiplicata* (normalidad, ortogonalidad y homocedasticidad, varianzas iguales) Solo en el orden de los residuos se encontró una varianza alta, la cual, al no repetirse en el resto de los grupos, se considera no representativa.

4. Discusión

Este estudio analizó la supervivencia de dos especies de anfibios, *Dryophytes eximius* y *Spea multiplicata*, frente a la exposición a organofosforados (OP), específicamente dimetoato. Los resultados revelan patrones claros y estadísticamente significativos que permiten discutir las implicaciones ecológicas y metodológicas de la investigación.

4.1. Correlación negativa entre la concentración de OP y la supervivencia

Ambas especies mostraron una correlación negativa entre la concentración de organofosforados y su supervivencia. Esto significa que, a medida que aumenta la concentración de OP, la supervivencia de las especies disminuye. Este hallazgo es consistente con estudios previos que han demostrado la toxicidad de los organofosforados en anfibios, los cuales afectan su sistema nervioso y su capacidad para sobrevivir en ambientes contaminados. La alta toxicidad de estos compuestos puede explicarse por su mecanismo de acción, que inhibe la enzima acetilcolinesterasa, esencial para el funcionamiento del sistema nervioso.

4.2. Validez estadística del modelo

El análisis de regresión mostró un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 91.4\%$ para OP), lo que indica que el modelo explica la relación entre los datos. Además, los valores de p menores a 0.05 para los componentes de la ecuación y el análisis de varianza (ANOVA) confirman que los resultados son estadísticamente significativos. Esto refuerza la confianza en que la relación observada entre la concentración de contaminantes y la supervivencia no es aleatoria, sino que refleja un efecto real.

4.3. Implicaciones ecológicas

Los resultados tienen implicaciones importantes para la conservación de estas especies, especialmente en áreas agrícolas donde los organofosforados se utilizan comúnmente como pesticidas. La disminución en la supervivencia de anfibios puede tener efectos en cascada en los ecosistemas, ya que estos animales desempeñan roles clave como depredadores de insectos y presas para otros animales. Además, la exposición OP también representa una amenaza adicional para *Spea multiplicata*, lo que subraya la necesidad de monitorear y regular el uso de estos contaminantes.

4.4. Limitaciones del estudio

Aunque los resultados son robustos, es importante considerar algunas limitaciones. Por ejemplo, la alta varianza observada en el orden de los residuales podría indicar la presencia de factores no controlados que afectan la supervivencia. Además, el estudio se centró en dos especies específicas, que pueden considerarse indicadores de la calidad ambiental. También sería útil evaluar los efectos combinados de múltiples contaminantes, ya que en ambientes naturales, los organismos están expuestos a una mezcla de sustancias tóxicas.

4.5. Recomendaciones para futuras investigaciones

Sería valioso ampliar el estudio para incluir más especies y evaluar los efectos combinados de múltiples contaminantes. También sería útil investigar los mecanismos fisiológicos específicos que hacen que estas especies sean sensibles a los organofosforados. La información sobre los efectos de los plaguicidas asociados a la agricultura es uno de los principales factores causantes del declive de la población mundial de los anfibios, que ha sido ampliamente documentada (Mann, 2009). Las investigaciones aplicadas a la ecotoxicología, principalmente con plaguicidas en anfibios. Se ha trabajado especialmente en datos derivados de investigaciones que se realizaron en bioensayos de toxicidad en laboratorios. Los siguientes estudios arrojaron resultados contundentes sobre los efectos letales de los daños neurotóxicos que afectan directamente sobre el sistema nervioso (Widder 2008; Brunelli 2009 et al., 2009; Agostini, 2010). Además, estudios previos evidencian los efectos negativos sobre el crecimiento, de la misma manera que sucede en *Hyla eximia* y *Spea multiplicata*, de acuerdo con la presente investigación (Richards y Kendall, 2003).

En el presente estudio fue posible mostrar que la exposición en condiciones de bioensayos que fueron replicados, de igual manera que fueron citados en la literatura, a mínima reducción de movimiento natatorio o, en su defecto, nado errático, así como el retraimiento del crecimiento, fueron resultados muy marcados durante la fase experimental (Linder y Lehman, 2005). El nivel de los efectos observados en los bioensayos

es concordante con las características del proceso de toxicidad, donde muchos estudios citados con anterioridad (Lehman y Williams, 2010).

La mayoría de estudios que documentan el efecto de plaguicidas fueron realizados en laboratorios y se manejaron bajo exposiciones a plaguicidas en forma de compuestos activos. Aún se encuentra poca información sobre investigaciones realizadas y disponible sobre el efecto que causan fórmulas comerciales como lo es el organofosforado como el dimetoato (Lehman y Williams, 2010).

5. Conclusiones

Este estudio evidencia que la exposición a organofosforados, específicamente al dimetoato, reduce significativamente la supervivencia larval de *Dryophytes eximius* y *Spea multiplicata* en el humedal de la Presa La Rucia (Tonalá, Jalisco). Los resultados demuestran una correlación negativa robusta entre la concentración del contaminante y la viabilidad de ambas especies ($R^2 = 91.4\%$ para OP; $p < 0.05$), validando su uso como bioindicadores de calidad ambiental. La alta sensibilidad de estos anfibios, incluso a bajas concentraciones de dimetoato (0.2-0.25 μg), resalta su vulnerabilidad ante actividades antropogénicas asociadas a la agricultura, como el uso de plaguicidas y la transformación del hábitat.

Los modelos de regresión obtenidos confirman que el dimetoato actúa como un factor crítico de estrés ecotoxicológico, con implicaciones directas en la disminución de biodiversidad y en la salud de los ecosistemas acuáticos. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de regular el uso de agroquímicos en zonas cercanas a cuerpos de agua y de implementar estrategias de monitoreo continuo que integren biomarcadores larvales. No obstante, se recomienda ampliar la investigación a condiciones *in situ* y evaluar efectos sinérgicos con otros contaminantes, considerando las limitaciones de los bioensayos controlados para replicar la complejidad de los ambientes naturales.

En conclusión, el trabajo aporta evidencia cuantitativa para la conservación de anfibios en regiones agrícolas, subrayando su papel como centinelas ambientales y la urgencia de políticas que equilibren el desarrollo agroindustrial con la sostenibilidad ecológica.

6. Referencias

- Albarca, N. & Herzig, M. (Eds.). (2002). *Manual para el manejo y la conservación de los humedales de México* (3.^a ed.). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Arizona Game and Fish Department; North American Wetland Conservation Council; U.S. Fish and Wildlife Service; Society of Wetland Scientists.
- Baird, S. F. (1854). *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 7, 61.
- Blaustein, A. R., Wake, D. B. & Sousa, W. P. (1994). Amphibian declines: Judging stability, persistence, and susceptibility of populations to local and global extinctions. *Conservation Biology*, 8(1), 60–71. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1994.08010060.x>
- Brunelli, E., Bernabó, I., Berg, C., Lundstedt-Enkel, K., Bonacci, A. & Tripepi, S. (2009). Environmentally relevant concentrations of endosulfan impair development, metamorphosis and behaviour in *Bufo bufo* tadpoles. *Aquatic Toxicology*, 91, 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.10.005>
- Cope, E. D. (1863). On *Trachycephalus*, *Scaphiopus* and other *Batrachia*. *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*, 15, 43–54.
- Farr, W., Godambe, A. & Lazcano, D. (2010). *Spea multiplicata* (Mexican Spadefoot). Predation. *Herpetological Review*, 41(2), 209.
- González-Ornelas, P. P. (2004). *Desarrollo de un baño de Vibrio parahaemolyticus* [Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara].
- González-Ornelas, P. P. (2016). *Estudio ecotoxicológico de biomarcadores ambientales (Amphibia) en el humedal Presa La Ruicia, municipio de Tonalá, Jalisco*. <http://sieg.gob.mx/contenido/Municipios/Tonala.pdf>
- Lehman, C. M. & Williams, B. K. (2010). Effects of current-use pesticides on amphibians. En D. W. Sparling, G. Linder & C. A. Bishop (Eds.), *Ecotoxicology of amphibians and reptiles* (2.^a ed., pp. 167–202). SETAC Press.
- Linder, G. & Lehman, C. M. (2005). Ecotoxicology of amphibians and reptiles in a nutshell. En D. W. Sparling, G. Linder & C. A. Bishop (Eds.), *Ecotoxicology of amphibians and reptiles* (2.^a ed., pp. 69–103). SETAC Press.

- Mann, R. M. & Hodson, H. R. (2009). Amphibians and agricultural chemicals: Review of the risks in a complex environment. *Environmental Pollution*, 157, 2903–2927. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.018>
- Mateo-Sagasta, J., Zadeh, S. M. & Turrall, H. (2017). *Water pollution from agriculture: A global review*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura; International Water Management Institute.
- Méndez-de la Cruz, F. R., Díaz de la Vega-Pérez, A. H. & Jiménez, V. H. (2009). Herpetofauna. En A. Lot & Z. Cano-Santana (Eds.), *Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel* (pp. 243–260). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Olvera-Mendoza, A. I., Hernández-Jiménez, E., Díaz-Marín, C. A. & Ramírez-Bautista, A. (2023). Primer registro de electromelia de *Dryophytes eximius* (Anura: Hylidae) del centro de México. *Revista Latinoamericana de Herpetología*, 6(3), e746. <https://doi.org/10.22201/fc.25942158e.2023.3.746>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2021). *Código Internacional de Conducta para la Gestión de Plaguicidas*. <https://www.fao.org/3/cb3328es/cb3328es.pdf>
- Palma, G., Barra, R., Ruiz, J., Parra, O., Pizarro, H. & Vera, J. (2009). Environmental risk assessment of pesticide residues in aquatic systems. *Chemosphere*, 76(6), 813–821. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.04.032>
- Pounds, J. A., Fogden, M. P. L. & Masters, K. L. (2005). Responses of natural communities to climate change in a highland tropical forest. En T. E. Lovejoy & L. Hannah (Eds.), *Climate change and biodiversity* (pp. 70–74). Yale University Press.
- Richards, S. M. & Kendall, R. J. (2003). Physical effects of chlorpyrifos on two stages of *Xenopus laevis*. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 66(1), 75–91. <https://doi.org/10.1080/00984100306412>
- Sánchez-Bayo, F., Hyne, R. V. & Navarro-Cantero, G. (2013). Ecological impacts of pesticides in freshwater ecosystems. *Science of the Total Environment*, 454–455, 1–326. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.051>

- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2004). *Boletín oficial*, núm. 004/04 [Mimeo].
- Soto-Cortés, J. J. (2016). La modificación del suelo agrícola a urbano en el municipio de Texcoco, estado de México. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 5(10), 106–132. <https://doi.org/10.31644/IMASD.10.2016.a05>
- Tonalá, H. Ayuntamiento de. (2010). Plan Municipal de Desarrollo de Tonalá 2010–2012.
- Wake, D. B. & Vredenburg, V. T. (2008). Are we in the midst of the sixth mass extinction? A view from the world of amphibians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(Suppl. 1), 11466–11473. <https://doi.org/10.1073/pnas.0801921105>
- Widder, P. D. & Bidwell, J. R. (2008). Tadpole size, cholinesterase activity and swim speed in four frog species after exposure to sub-lethal concentrations of chlorpyrifos. *Aquatic Toxicology*, 88, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2008.03.005>

