


COMMENTARY / COMENTARIO

SENTINEL SERVICE TECHNOLOGY IN AQUATIC ECOTOXICOLOGY
THROUGH BIOECOTOXIMONITORSTECNOLOGÍA DE SERVICIO CENTINELA EN ECOTOXICOLOGÍA
ACUÁTICA MEDIANTE LOS BIOECOTOXIMONITORESGeorge Argota-Pérez¹

¹ Centro de Investigaciones Avanzadas y Formación Superior en Educación, Salud y Medio Ambiente "AMTAWI". Ica, Perú.
george.argota@gmail.com
Corresponding author: george.argota@gmail.com

George Argota-Pérez:  <https://orcid.org/0000-0003-2560-6749>

ABSTRACT

Aquatic ecosystems are under continuous pressure from industrial, agricultural, and urban contaminants that form complex mixtures, making their evaluation highly challenging. Traditional chemical analyses perform an essential role but fail to accurately represent the real impact of these substances on biota. In this context, the bioecotoximonitor—defined as a fish with physiological and behavioral sensitivity to pollutants and associated with an indicator organism represents an innovation in aquatic ecotoxicology. The proposal focuses on a service-oriented technology that provides standardized environmental monitoring bioassays. This service includes breeding and maintenance protocols, exposure tests under laboratory or field conditions, recording of physiological and behavioral variables, and the issuance of reports with scientific and regulatory value. The main strength of the bioecotoximonitor lies in its ability to detect sublethal effects and behavioral alterations that precede ecological deterioration. Compared to conventional methods, it offers a comprehensive and sensitive perspective on the combined action of pollutants. Its technological foundation is supported by ecotoxicology, animal physiology, and behavioral biology, ensuring relevance and reproducibility. Thus, the bioecotoximonitor, as a sentinel organism, strengthens water management, ecotoxicological monitoring, and the integration of knowledge among academic, regulatory, and industrial sectors.

Keywords: aquatic ecotoxicology - bioecotoximonitor - environmental monitoring - sentinel organism - technological service

RESUMEN

Los ecosistemas acuáticos reciben presión constante por contaminantes industriales, agrícolas y urbanos que conforman mezclas complejas de difícil evaluación. Los análisis químicos tradicionales cumplen una función esencial, pero no

Este artículo es publicado por la revista *Neotropical Helminthology* de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemática, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú auspiciado por la Asociación Peruana de Helmintología e Invertebrados Afines (APHIA). Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) [<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.es>] que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.

DOI: <https://dx.doi.org/10.62429/rnh20251922011>

expresan con precisión el impacto real de estas sustancias sobre la biota. En este contexto, el bioecotoximonitor, definido como un pez con sensibilidad fisiológica y conductual frente a contaminantes y que está asociado a un organismo indicador, representa una innovación para la ecotoxicología acuática. La propuesta se orienta a una tecnología de servicio que ofrece ensayos estandarizados de vigilancia ambiental. El servicio incluye protocolos de cría y mantenimiento, pruebas de exposición en laboratorio o en campo, registro de variables fisiológicas y conductuales y emisión de informes con valor científico y regulatorio. La fortaleza del bioecotoximonitor reside en su capacidad para detectar efectos subletales y alteraciones conductuales que anticipan el deterioro ecológico. Frente a los métodos convencionales, aporta una visión integral y sensible sobre la acción combinada de contaminantes. Su base tecnológica se apoya en la ecotoxicología, la fisiología animal y la biología del comportamiento, garantizando pertinencia y reproducibilidad. Así, el bioecotoximonitor como organismo centinela fortalece la gestión del agua, la vigilancia ecotoxicológica y la articulación entre sectores académicos, regulatorios e industriales.

Palabras clave: bioecotoximonitor - ecotoxicología acuática - monitoreo ambiental - organismo centinela - servicio tecnológico

La evaluación de los ecosistemas acuáticos bajo el impacto de contaminantes de origen antropogénico constituye un desafío científico y tecnológico de primer orden (Zolkefli *et al.*, 2020). Los métodos tradicionales de monitoreo, basados fundamentalmente en análisis químicos de agua y sedimentos, si bien permiten identificar concentraciones de sustancias específicas, presentan limitaciones al momento de valorar los efectos integrales y sinérgicos de mezclas de contaminantes sobre los organismos vivos (Quesada *et al.*, 2015). Ante este escenario, la ecotoxicología ha evolucionado hacia la incorporación de organismos centinela capaces de reflejar de manera sensible y dinámica las respuestas biológicas frente a la contaminación (Carvalho *et al.*, 2025). En este contexto, especies de peces larvívoros de culícidos, como *Poecilia reticulata* (Peters, 1859), poseen un doble valor ecológico y tecnológico: además de su papel reconocido en el control biológico de vectores de importancia médica, también exhiben alta sensibilidad fisiológica y conductual ante la exposición a contaminantes. En este sentido, los bioecotoximonitores definidos como peces que reúnen características fisiológicas, etológicas y ecológicas idóneas se configuran como una herramienta innovadora para la construcción de una tecnología de servicio destinada a la vigilancia ambiental (Argota *et al.*, 2023).

La tecnología de servicio centinela basada en bioecotoximonitores se caracteriza por constituir un modelo biológico aplicado, en el cual un pez seleccionado actúa como indicador integral de la calidad del agua (Argota *et al.*, 2023). En este marco, los peces larvívoros de culícidos, como *P. reticulata* y *Gambusia punctata* (Poey, 1854), representan organismos de alto valor funcional por su adaptabilidad ecológica y su sensibilidad frente

a contaminantes disueltos. Su comportamiento activo, su dieta asociada a microinvertebrados acuáticos y su distribución en cuerpos de agua continentales neotropicales los convierten en excelentes bioindicadores para detectar perturbaciones ambientales (de Castilhos *et al.*, 2020; Aguiar *et al.*, 2023; Lima *et al.*, 2024). A diferencia de los equipos electrónicos o dispositivos físico-químicos de monitoreo, el bioecotoximonitor es un organismo vivo que manifiesta respuestas fisiológicas y conductuales ante exposiciones subletales, las cuales no se evidencian mediante análisis convencionales. Su aplicación se orienta hacia la prestación de un servicio especializado de bioensayos ecotoxicológicos, en el que se implementan protocolos estandarizados de exposición, registro de variables fisiológicas y etológicas, y análisis comparativos frente a condiciones de referencia o control (Argota, 2024).

La tecnología, por lo tanto, no consiste en la comercialización del organismo, sino en la oferta de un servicio que emplea al bioecotoximonitor como recurso biológico dentro de un proceso científico-técnico validado. En este contexto, el uso de peces larvívoros del género *Poecilia* adquiere especial relevancia, pues su manejo controlado y su función ecológica en la reducción de poblaciones de culícidos integran un componente sanitario y ambiental de interés para la región neotropical. Esta condición les confiere un doble valor: actuar como organismos centinela en ecotoxicología acuática y, simultáneamente, representar modelos biológicos útiles para comprender la relación entre contaminación, biodiversidad y dinámica de hospedadores o vectores asociados a helmintos. De este modo, la tecnología de servicio se consolida como una plataforma interdisciplinaria que combina la ecotoxicología, la biología

aplicada y la salud ambiental en un marco de vigilancia científica continua (Vindimian, 2001; Rodríguez *et al.*, 2019; Argota *et al.*, 2023).

El fundamento científico de los bioecotoximonitores se sostiene en principios de la ecotoxicología, la fisiología animal y la biología del comportamiento. La ecotoxicología establece que los organismos vivos integran en sus respuestas los efectos acumulados de contaminantes, incluyendo interacciones y sinergias que no pueden explicarse mediante la simple suma de concentraciones químicas. En este contexto, los peces larvivos, ampliamente distribuidos en ambientes neotropicales, ofrecen un modelo experimental de alta sensibilidad y pertinencia ecológica. Su fisiología adaptable a gradientes de salinidad, su comportamiento activo en la superficie acuática y su papel en la regulación de poblaciones de culícidos les confieren ventajas para estudiar la influencia de los contaminantes sobre procesos biológicos complejos. Además, al interactuar con microinvertebrados y larvas potencialmente involucradas en ciclos parasitarios, estos peces proporcionan información valiosa sobre las posibles alteraciones en la dinámica de transmisión de helmintos u otros organismos acuáticos asociados a la contaminación. En consecuencia, los organismos larvivos funcionan como un bioecotoximonitor con capacidad para reflejar, de manera fisiológica y conductual, tanto los efectos directos de los contaminantes como las implicancias ecológicas y sanitarias derivadas de su presencia en los ecosistemas acuáticos (Gekière *et al.*, 2024; Liu & Sayes, 2024).

Desde la fisiología se reconoce que ciertos peces expresan sensibilidad medible en parámetros como la frecuencia respiratoria, las alteraciones del sistema nervioso, la actividad enzimática y los biomarcadores de estrés oxidativo ante la exposición a contaminantes (Poopal, 2024; Formicki *et al.*, 2025). La biología del comportamiento complementa este enfoque al ofrecer indicadores adicionales, tales como variaciones en los patrones de nado, alimentación o respuesta a estímulos, que evidencian alteraciones subletales antes de que ocurra la mortalidad (Huang *et al.*, 2014). Esta fundamentación científica permite sostener que el bioecotoximonitor es una herramienta sensible y confiable para la detección temprana de contaminación en los cuerpos de agua (Argota, 2024).

El problema tecnológico que aborda esta propuesta se relaciona con la carencia de herramientas integrales de monitoreo ambiental capaces de evaluar el impacto real de los contaminantes en los ecosistemas acuáticos. En la actualidad, los programas de vigilancia ambiental se sustentan principalmente en la medición de parámetros físico-químicos como pH, oxígeno disuelto, nitrógeno,

fósforo o metales pesados, los cuales, aunque útiles, resultan insuficientes (Mitra, 2019; Backhaus *et al.*, 2019; Zolkeffi *et al.*, 2020). Dichos métodos no evidencian los efectos biológicos acumulados ni el riesgo ecológico derivado de la interacción de contaminantes en ríos, lagunas, estuarios o efluentes industriales. Asimismo, los bioensayos convencionales con organismos de laboratorio carecen, en muchos casos, de pertinencia ecológica, pues no emplean especies representativas del entorno local. Esta brecha tecnológica restringe la posibilidad de tomar decisiones oportunas y basadas en evidencia científica para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Kanthimathi *et al.*, 2023).

La tecnología de servicio centinela basada en bioecotoximonitores ofrece una solución efectiva a esta limitación mediante la incorporación de un pez con características fisiológicas, conductuales y ecológicas que lo convierten en un modelo biológico idóneo. Su adaptación a las condiciones locales permite registrar de manera más precisa los efectos de la contaminación sobre la fauna acuática regional, proporcionando información directa y sensible acerca del estado ecológico de los cuerpos de agua y fortaleciendo la capacidad de diagnóstico ambiental en contextos específicos (Argota *et al.*, 2023).

La solución técnica consiste en establecer protocolos de bioensayo estandarizados que contemplen:

- 1) La cría y mantenimiento controlado del bioecotoximonitor
- 2) La exposición a muestras de agua o efluentes bajo condiciones de laboratorio o *in situ*
- 3) La medición de parámetros fisiológicos, conductuales y bioquímicos; y
- 4) La interpretación de resultados en reportes con valor científico y regulatorio.

De esta manera, se ofrece un servicio tecnológico capaz de generar información relevante para autoridades ambientales, empresas privadas y centros de investigación. Entre las características destacables de esta tecnología se encuentran:

- 1) Sensibilidad biológica: los bioecotoximonitores pueden detectar contaminantes en niveles subletales, antes de que ocurran daños irreversibles en poblaciones naturales.
- 2) Pertinencia ecológica: al tratarse de especies adaptadas al medio local, los resultados tienen mayor validez ambiental que los obtenidos con especies exóticas.
- 3) Reproducibilidad: mediante protocolos estandarizados, los ensayos pueden replicarse en diferentes laboratorios

e instituciones, garantizando comparabilidad de resultados.

- 4) **Integralidad:** los bioecotoximonitores permiten evaluar efectos acumulados de mezclas de contaminantes, superando la limitación de métodos que analizan sustancias de forma aislada.
- 5) **Transferibilidad:** la tecnología puede aplicarse en distintos contextos, desde evaluaciones académicas hasta monitoreo regulatorio de la calidad del agua.

En la actualidad, los bioensayos con peces empleados como organismos centinela se desarrollan principalmente en contextos académicos y en proyectos de investigación aplicada. No obstante, su transferencia hacia el ámbito tecnológico y de servicios ambientales permanece en etapa inicial. Algunas experiencias internacionales han implementado especies modelo para fines de monitoreo, aunque su uso aún carece de estandarización operativa y validación en condiciones locales, lo que evidencia la necesidad de consolidar protocolos y fortalecer capacidades técnicas para su adopción como servicio especializado (como *Danio rerio*, Hamilton-Buchanan, 1822, o *P. reticulata*) para ensayos de toxicidad (Magyary, 2018; Leena & Raj, 2023). La propuesta de bioecotoximonitores introduce un valor diferencial que refiere la selección de especies con características particulares para actuar como centinelas locales. La cadena de valor de esta tecnología abarca varias etapas:

- 1) **Producción y mantenimiento biológico:** cría de bioecotoximonitores en condiciones controladas.
- 2) **Diseño de protocolos de ensayo:** estandarización de métodos de exposición y registro de parámetros.
- 3) **Prestación del servicio:** aplicación de los ensayos a muestras ambientales de clientes públicos o privados.
- 4) **Generación de informes:** interpretación de resultados con validez científica y regulatoria.
- 5) **Transferencia y capacitación:** formación de técnicos e instituciones en el uso del bioecotoximonitor como herramienta de vigilancia ambiental.

La fundamentación tecnológica de este servicio radicó en su capacidad de integrar principios científicos con aplicaciones prácticas en la gestión ambiental. Se trata de una innovación que convierte un organismo biológico en un recurso

tecnológico, articulando biología, ecotoxicología y gestión ambiental. La utilización de bioecotoximonitores aporta una ventaja estratégica frente a las tecnologías convencionales, al ofrecer un servicio más sensible, pertinente y transferible. Además, se alinea con tendencias globales en biotecnología ambiental, donde los organismos vivos son considerados sensores biológicos de contaminación (Argota *et al.*, 2023; Argota, 2024).

La propuesta refuerza la necesidad de metodologías que complementen los análisis químicos con enfoques biológicos, asegurando diagnósticos más completos y una gestión sostenible de los recursos acuáticos.

Se concluye que, la introducción de la tecnología de servicio centinela basada en bioecotoximonitores no solo cubre una brecha en el monitoreo ambiental, sino que abre una vía de transferencia de conocimiento hacia sectores productivos y reguladores. Su potencial radica en transformar un recurso biológico en una herramienta tecnológica de alta aplicabilidad, contribuyendo a la vigilancia ecotoxicológica, la sostenibilidad hídrica y la protección de la biodiversidad acuática.

Author contribution: CRediT (Contributor Roles Taxonomy)

GAP = George Argota-Pérez

Conceptualization: GAP

Data curation: GAP

Formal Analysis: GAP

Funding acquisition: GAP

Investigation: GAP

Methodology: GAP

Project administration: GAP

Resources: GAP

Software: GAP

Supervision: GAP

Validation: GAP

Visualization: GAP

Writing – original draft: GAP

Writing – review & editing: GAP

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, O.F., Ferreira, L., Pedro dos Santos, A.C., Ribeiro, J.S., Silva de Moura, L., Taube, P.S., Barbosa de Santana, M., Gul, K., Malik, S., & Lopes, R.B. (2023). Estudos de ecotoxicidade aquática no Brasil: o uso de peixes de vida livre como organismos-teste. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 13, 224-246.
- Argota, P.G. (2024). Cuarta dimensión en el uso del bioecotoxímonitor en ecotoxicología acuática. *Biotempo*, 21, 269-276.
- Argota, P.G., Rodríguez, S.M.A., & Iannacone, J. (2023). Paradigma de transformación de los biomonitores a la calidad de bioecotoxímonitores en ecotoxicología acuática. *The Biologist (Lima)*, 21, 195-201.
- Backhaus, T., Brack, W., Van den Brink, P.J., Deutschmann, B., Deutschmann, B., Hollert, H., Hollert, H., Posthuma, L., Segner, H., Seiler, T.B., Teodorovic, I., & Focks, A. (2019). Assessing the ecological impact of chemical pollution on aquatic ecosystems requires the systematic exploration and evaluation of four lines of evidence. *Environmental Sciences Europe*, 31, 1-9.
- Carvalho, F., Loyau, A., Kelly, I.M., & Schmeller, D.S. (2025). Aquatic ecosystem indices, linking ecosystem health to human health risks. *Biodiversity and Conservation*, 1, 1-46.
- de Castilhos, G.N., Larentis, C., de Oliveira, E.C., de Almeida, R.A., Cappelli, W.C., da Silva, A.P., Pereira, N.M., Giachini, Z.A., de Oliveira, C.N.G., de Arruda, A.J.P., & Delariva, R.L., de Almeida, R.A., de Oliveira, R.C.A., & Barreto, S.deL.E. (2020). Environmental assessment of neotropical streams using fish as bioindicators: a multibiomarker and integrated approach. *Hydrobiologia*, 849, 4587-4604.
- Formicki, G., Goc, Z., Bojarski, B., & Witeska, M. (2025). Oxidative stress and neurotoxicity biomarkers in fish toxicology. *Antioxidants*, 14, 939.
- Gekièrè, A., Ghisbain, G., Gérard, M., & Michez, D. (2024). Towards unbiased interpretations of interactive effects in ecotoxicological studies. *Environmental Research*, 259, 119572.
- Huang, Y., Zhang, J.-S., Han, X., & Huang, T. (2014). The use of zebrafish (*Danio rerio*) behavioral responses in identifying sublethal exposures to deltamethrin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 3650-3660.
- Kanthimathi, M., Morrvén, R., Madhan, N., & Nataraj, T.R. (2023). Water monitoring system for aquatic organisms. *International Research Journal on Advanced Engineering Hub*, 1, 24-31.
- Leena, R., & Raj, D.S. (2024). Toxicity bioassay of a textile industry effluent using the teleost fish *Poecilia reticulata*. *Ecology, Environment & Conservation*, 30, 1661-1665.
- Lima, M.R., Lima, A.C.S.deO., Roque, deF.B., de Araújo, A.doN., & Pimentel, deO.A.C. (2024). Efeito do congelamento das amostras de água nos ensaios de ecotoxicidade com *Danio rerio*. *Revista Contemporânea*, 4, e3450.
- Liu, J.Y., & Sayes, C.M. (2024). Modeling mixtures interactions in environmental toxicology. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 106, 104380.
- Magyary, I. (2018). Recent advances and future trends in zebrafish bioassays for aquatic ecotoxicology. *Ecocycles*, 4, 12-18.
- Mitra, A. (2019). Monitoring and management of pollution level (pp. 321–363). Springer, Cham.
- Poopal, R.K. (2024). Biological-based techniques for real-time water-quality studies: Assessment of non-invasive (swimming consistency and respiration) and toxicity (antioxidants) biomarkers of zebrafish. *Chemosphere*, 352, 141268.
- Quesada, G.A., Valdehita, A., del Olmo, I., Gómez, M.J., Gómez, M.J., & Navas, J.M. (2015). Detection of effects caused by very low levels of contaminants in riverine sediments through a combination of chemical analysis, in vitro bioassays, and farmed fish as sentinel. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 68, 663-677.
- Rodríguez, M.S., Hidalgo, G., Brito, L., Arrebola, M., Morales, L., Hernández, D., Sánchez, D., Rodríguez, G.J., & Ponce de León, J.L. (2019). Partial trophic segregation in co-occurring *Gambusia* species (Cyprinodontiformes: Poeciliidae) in a natural wetland of Cuba. *Revista de Investigaciones Marinas*, 39, 117-130.
- Vindimian, E. (2001). The biological monitoring of toxic impacts on the environment. *Cellular and Molecular Biology*, 47, 1309-1318.

Zolkefli, N., Sharuddin, S.S., Mohd Yusoff, M.Z., Hassan, M.A., Maeda, T., & Ramli, N. (2020). A review of current and emerging approaches for water pollution monitoring. *Water*, 12, 3417.

Received August 30, 2025.

Accepted October 6, 2025.