

## Artículo de divulgación

# Uso de helmintos como bioindicadores en la Acuicultura

Use of helminths as bioindicators in Aquaculture

María Clara Rosas-Gutiérrez<sup>1</sup> & David García-Mondragón<sup>1</sup> 

### Resumen

Los helmintos de peces son organismos susceptibles a cambios en la calidad del agua, por lo que pueden ser una opción para el monitoreo en la acuicultura. Entre los parámetros fisicoquímicos que pueden servir como bioindicadores, se encuentran amonio, nitritos y nitratos, temperatura, oxígeno disuelto y dureza del agua; pudiendo asociarse a la presencia, ausencia y prevalencia de determinados grupos taxonómicos, proporcionando datos útiles para la toma de decisiones en la producción acuícola.

**Palabras clave:** Helmintos, bioindicadores, calidad del agua, producción acuícola, monitoreo.

Recibido: 06 de agosto de 2025.

### Abstract

Fish helminths are proposed as an alternative efficient for water quality monitoring in aquaculture; supplementing those already used. They can measure parameters such as ammonium, nitrite and nitrate, temperature, dissolved oxygen, and hardness, according to their presence, absence, and prevalence, providing useful data to improve deciding aquaculture production.

**Key words:** Helminth, bioindicators, water quality, aquaculture production, monitoring.

Aceptado: 16 de enero de 2025.

## Introducción

En México, la acuicultura, es un sector que ha ido creciendo constantemente (Platas-Rosado 2018); tomando importancia en ámbitos, económico, la gestión integral del agua, la seguridad alimentaria y la conservación de la biodiversidad. Económicamente representa una fuente de ingresos primaria en comunidades rurales y costeras, contribuyendo significativamente a la economía del país; además de proporcionar complemento a otras industrias, como la pesquera, que subvenciona al desarrollo sostenible en las regiones donde se desarrolla (Martínez-Cordero *et al.* 2021).

La acuicultura, particularmente la que se realiza en aguas continentales, depende directamente del buen estado de los cuerpos de agua por lo que es necesario un manejo responsable y la conservación

de estos sistemas (CONAPESCA 2018). También ayuda a reducir las presiones que se ejercen sobre los cuerpos de agua, preservando las poblaciones naturales, evitando la sobreexplotación de los recursos, y disminuyendo la pesca extractiva (SAGARPA 2022). Respecto a la seguridad alimentaria, dada la elevada demanda de productos pesqueros en México, la acuicultura ofrece una solución sustentable para satisfacerla, garantizando fuentes de alimento nutritivas y de alta calidad para la población (García-Medel 2022).

## Calidad del agua

Para lograr una producción acuícola exitosa se deben considerar algunos parámetros constantes sobre la calidad del agua, que promuevan el crecimiento

<sup>1</sup> Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, UAEMéx, Carretera Toluca-Ixtlahuaca, kilómetro 14.5, San Cayetano Morelos, Toluca, Estado de México. CP. 50120.

\* Autor de correspondencia: mrosasg778@alumno.uaemex.mx (MCRG)

Esta obra fue creada bajo licencia de Creative Commons Reconocimiento No Comercial- Sin Obra Derivada 4.0 International



y mantenimiento de los organismos, por lo que deben monitorearse regularmente. El cultivo de los organismos depende en gran medida de dichas condiciones físicas y químicas del agua (Briones-Pérez *et al.* 2017); y aunque existen parámetros generales como oxígeno, temperatura y pH, es necesario mantener las condiciones físicas, químicas e incluso biológicas dentro de los límites óptimos de tolerancia específicos para la especie a cultivar (López-Acopa *et al.* 2023).

Entre los parámetros que son comúnmente medidos están la temperatura, turbidez, oxígeno disuelto, alcalinidad o acidez (pH), sólidos suspendidos totales, nitritos, nitratos, amonio y dureza del agua. Por ejemplo, para el cultivo de tilapia, los rangos óptimos de ciertos parámetros, para su crecimiento, son: oxígeno disuelto de 1-5 mg/L, temperatura de 20°-32°C, pH de 6.5-8.5, amonio total de 0-0.05 mg/L, nitratos de 0-100 mg/L, nitritos de 0.02-0.2 mg/L y dureza del agua de 50-350 mg/L (Acosta-Pérez *et al.* 2022, Wanja *et al.* 2020).

### **Medición de la calidad del agua**

La medición de los parámetros de calidad del agua se debe definir de acuerdo con las necesidades de la producción; sin embargo, la accesibilidad al equipo especializado y conocimiento del parámetro medido juega un papel fundamental en su control diario, dado que algunos parámetros necesitan de equipos especializados por la forma en la que se encuentran disueltos en el agua, sin embargo, hay otros parámetros que no lo necesitan (Briones-Pérez *et al.* 2017). Por ejemplo, la temperatura, la turbidez, el pH y los sólidos suspendidos totales son parámetros que no necesitan equipos especiales para medirse o de personal especializado para interpretarse (Dey *et al.*

2021).

La temperatura se puede medir con termómetros; la turbidez a simple vista al notar la claridad del agua o con un disco de Secchi; el pH con medidores básicos, como papel indicador de pH; y los sólidos suspendidos totales se pueden medir filtrando el agua. Por su parte el oxígeno disuelto, la dureza del agua y los compuestos nitrogenados (nitritos, nitratos y amonio) sí necesitan de equipos especializados para medirse, por ejemplo, oxímetros, espectrofotómetros, kits de prueba, o sondas multiparamétricas, entre otros (Chidiac *et al.* 2023).

En México la mayoría de las granjas de producción acuícola se encuentran en regiones rurales, donde el acceso económico y al conocimiento se ve limitado, por lo que los productores se enfrentan a desafíos específicos en torno a la medición de los parámetros de calidad del agua (Monge-Quevedo 2022, Norzagaray-Campos *et al.* 2012).

Usualmente los productores recurren a la medición de los parámetros que no necesitan de especialización o tecnología específica para medirse, dejando de lado los parámetros que sí lo requieren, los cuales los pueden medir ciertas instituciones o servicios públicos, sin embargo, estos pueden llegar a ser lentos o costosos para los productores, poniendo en riesgo la sobrevivencia del cultivo, afectando la eficiencia y optimización del sistema.

La implementación de estrategias eficientes y accesibles podría mejorar la gestión de las unidades y garantizar su sustentabilidad; por lo que existen alternativas que permiten medir los parámetros de calidad del agua sin la necesidad de ser medidos explícitamente por un equipo o material, como los

indicadores biológicos.

### *Indicadores biológicos*

Está demostrado científicamente que los cambios en el ambiente producen también cambios en las estructuras de las comunidades biológicas, en especial aquellas especies sensibles a ciertas condiciones; por lo que, en 1993 surgió la idea de medir el impacto que causaban los distintos niveles de contaminación, o situaciones de estrés, en las comunidades biológicas de un sitio (Domínguez & Adonis-Giorgi 2020). Entonces nace el concepto de “Indicador biológico” o “Bioindicador”, que es un organismo o un grupo de organismos que reflejan las condiciones ambientales y pueden señalar cambios o alteraciones en el mismo (Serafín-Muñoz *et al.* 2022).

Los bioindicadores pueden aplicarse para el aire, el suelo y el agua. Por ejemplo, bioindicadores del aire son comúnmente plantas o líquenes, que dependen de las condiciones atmosféricas para sobrevivir (Cornejo & Heberd 2022), por lo que indican cambios en ello. Por su parte los bioindicadores del suelo, que pueden ser organismos meramente terrestres e indican cambios en todo el sistema ambiental terrestre incluyendo su interacción con otros organismos o simplemente la contaminación edáfica (Aguirre-Cortés 2021). Finalmente, los indicadores del agua son aquellos que dependen de las condiciones del agua para vivir e indican cambios en la calidad de esta (González *et al.* 2023).

La calidad del agua es una de las áreas en los que se utilizan los indicadores biológicos para inferir parámetros fisicoquímicos. Para ello existen una serie de pruebas biológicas con organismos vivos que permiten evaluar la calidad

del agua; entre los más comunes se encuentran las pulgas de agua (género *Daphnia*) que son crustáceos sensibles a los cambios en la calidad del agua, los cuales, por su supervivencia, reproducción y comportamiento pueden indicar cambios en ella (Ebert 2022). Otros organismos comúnmente usados son las algas (diatomeas), que con su presencia y diversidad pueden indicar la disponibilidad de nutrientes y contaminación en el agua (González *et al.* 2023, Costa & Schneck 2022).

Entre los grupos taxonómicos que se utilizan de manera más frecuente, se encuentran los macroinvertebrados acuáticos, que incluyen insectos, larvas de insectos, y otros organismos que dependen del agua para completar su ciclo de vida, que con su presencia, ausencia y diversidad reflejan la salud de un sistema acuático (Tampo *et al.* 2021).

No obstante, la importancia que ha adquirido recientemente los macroinvertebrados, existen otros grupos de organismos que no son tan populares, pero que también permiten medir la calidad del agua en sistemas acuáticos. Entre ellos se encuentran los protozoarios y bacterias; sin embargo, su identificación taxonómica, costo y manejo puede ser compleja, lo cual ha dificultado su uso como indicadores. Aunque su sensibilidad a los cambios en la calidad del agua puede indicar la contaminación, su aplicación actualmente no es tan común (Costa & Schneck 2022, González *et al.* 2023).

Por otro lado, una alternativa emergente y prometedora para evaluar la calidad del agua en la producción acuícola son los helmintos; estos organismos se encuentran presentes dentro del sistema de producción acuícola y se han relacionado con procesos infecciosos de los peces, sin embargo, hasta el momento

se han subestimado, ya que pueden proporcionar información valiosa sobre la salud del sistema (Paredes-Trujillo & Mendoza-Carranza 2022). Su presencia, abundancia y diversidad pueden estar relacionadas con factores de la calidad del agua, contaminantes en ella o con las prácticas y manejos en las unidades de producción.

### *Helmintos como bioindicadores*

Estos organismos invertebrados son un grupo diverso que presentan una variedad de formas y tamaños. Pueden encontrarse dentro de toda clase de organismos, desde plantas, hasta al ser humano, y están presentes en diversos órganos de su hospedero como intestinos, músculos, hígado, pulmones, sistema circulatorio, etc. (Rojas-Pantoja *et al.* 2023). Su incidencia puede ser relativamente inofensiva, y en algunas raras ocasiones pueden causar enfermedades graves; su ciclo de vida puede involucrar a otros hospederos (intermediarios), además del hospedero definitivo, y puede llegar a ser complejo (Grano-Maldonado & Pérez-Ponce de León 2023).

Taxonómicamente se conforman por cinco clases, agrupadas en tremátodos, nemátodos, monogéneos, acantocéfalos y céstodos. Los tremátodos, comúnmente conocidos como “duelas” son parásitos internos (endoparásitos) y suelen tener ciclos de vida complejos con varios hospederos intermediarios; los nemátodos o “gusanos redondos”, son parásitos que incluyen lombrices intestinales y filarias, usualmente se encuentran de forma interna; los céstodos, conocidos como “tenias”, son planos y segmentados del intestino de los vertebrados; los acantocéfalos, también son gusanos con espinas en la parte anterior de su cuerpo;

y los monogéneos, son aplanados con ganchos, ciclos de vida simples, suelen ser externos (ectoparásitos), son los más comunes en peces y otros vertebrados (Grano-Maldonado & Pérez-Ponce de León 2023).

Los helmintos de peces pueden ser endoparásitos (al interior del pez) o ectoparásitos (en órganos externos), e incluyen a los cinco grupos mencionados anteriormente. Los primeros, pueden causar diversas afecciones en los peces, principalmente en el sistema digestivo, causando pérdida de peso, anemia, o deterioro en la absorción de nutrientes. Por su parte, los ectoparásitos pueden generar irritación y daños en la piel y branquias, alterar el comportamiento, la alimentación, y son más fáciles de transmitirse entre organismos (Rojas-Pantoja *et al.* 2023). Además de las afecciones a los peces, estos también afectan a la acuicultura, perjudicando principalmente la calidad del producto, así como el crecimiento del pez y, por lo tanto, la producción en general.

A pesar de que los helmintos de peces son considerados como agentes nocivos para los organismos y para la producción acuícola en general, resultan ser un bioindicador muy útil para algunos parámetros de calidad del agua; se ha demostrado que ciertas especies presentes en los peces están correlacionadas con los parámetros de calidad del agua (Ojwala *et al.* 2018, Biswal 2020, Wanja *et al.* 2020), particularmente aquellos parámetros que resultan ser difíciles o menos comunes de medir por los productores.

Diversos estudios han registrado qué en ciertos niveles de parámetros fisicoquímicos del agua, se promueve la infección por parásitos en peces. Particularmente niveles de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) mayores a 100 mg/L, de 0.2 mg/L en

nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) y amonio mayores a 0.05 mg/L, tienen una correlación positiva con la presencia de estos parásitos (Wanja *et al.* 2020, Acosta-Pérez *et al.* 2022).

Por su parte la dureza del agua también tiene una correlación positiva con la presencia de estos organismos en los cultivos, por ejemplo, si las concentraciones de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) es mayor del óptimo (350 mg/L) hay más prevalencia de estos parásitos (Acosta-Pérez *et al.* 2022). Y más en específico, se han registrado especies de parásitos con ciertos rangos de los parámetros, por ejemplo, monogéneos del género *Cichlidogyrus* están correlacionados de forma positiva con niveles bajos de oxígeno disuelto, en un rango de 1.6-3.2 mg/L (Ojwala *et al.* 2018).

Por otra parte, tremátodos del género *Clinostomum* se relacionan de forma negativa con el oxígeno disuelto, a medida que el oxígeno disuelto en el agua esté en el rango óptimo, habrá menos incidencia de este parásito; y la temperatura que, en esta especie tiene una correlación negativa, con la especie de tremátilo *Contracaecum* tiene una relación positiva (Adamba *et al.* 2020), por lo que si la temperatura fluctúa por arriba de los rangos óptimos, podríamos encontrar altas prevalencias de la especie *Contracaecum*, y si por el contrario la temperatura fluctúa por debajo de los rangos óptimos, podrían encontrarse altas prevalencias de *Clinostomum*.

Además de la relación entre estos parámetros fisicoquímicos con ciertas especies de parásitos, se ha observado que ciertas prácticas y manejos específicos dentro del sistema acuícola por parte del productor, influyen tanto en los parámetros de calidad del agua como en la presencia de los parásitos. Entre ellos se ha reportado que el alimento que se proporciona a los peces por su

alto contenido proteínico puede generar que las concentraciones de amonio en el agua aumenten, tanto por el alimento no consumido, como por ser el desecho natural de los peces (Wanja *et al.* 2020).

El uso de estiércol proveniente de otras actividades agropecuarias, usado principalmente para la promoción del crecimiento de microorganismos que contribuyen a la salud de los peces reduciendo enfermedades en la mucosa, contribuyendo a la digestión y manteniendo la calidad del agua del sistema (Minich *et al.* 2018), puede contribuir a la mortalidad de los peces y a la susceptibilidad de adquirir parásitos (Wanja *et al.* 2020); y la sobrecarga de la capacidad en el estanque, altas densidades de organismos dentro de un estanque ocasiona que los peces estén más cerca y haya roces entre ellos aumentando la posibilidad de infectarse entre sí (Wanja *et al.* 2020, Acosta-Pérez *et al.* 2022).

## Conclusión

Los helmintos pueden ser una herramienta útil en la medición de la calidad de agua para la acuicultura; evidenciando cambios en parámetros clave para la producción. Dado que los métodos convencionales requieren de conocimiento especializado y tienen costos elevados para algunos productores, es necesario promover alternativas que permitan el monitoreo de los parámetros fisicoquímicos asociados a la producción acuícola.

Estos organismos cumplen con los atributos deseables para un indicador biológico; son un método más económico y sencillo de utilizar en comparación con los sistemas de medición fisicoquímicos tradicionales, no necesitan de capacitaciones con largos tiempos de entrenamiento ni especializados;

proporcionando una alternativa viable para la gestión y toma de decisiones en los sistemas de producción acuícola.

## Referencias

- Acosta-Pérez, V. J., V. Vega-Sánchez, T. E. Fernández-Martínez, Zepeda-Velázquez, A. P., Reyes-Rodríguez, N. E., Ponce-Noguez, J. B., A. Peláez-Acero, J. L. de-la-Rosa-Arana & F. R. Gómez-De-Anda. 2022.** Physicochemical Water Quality Influence on the Parasite Biodiversity in Juvenile Tilapia (*Oreochromis* spp.) Farmed at Valle Del Mezquital in the Central-Eastern Socioeconomic Region of Mexico. *Pathogens*, 11(10):1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/pathogens11101076>
- Adamba Kamau, S. W., E. O. Otachi, & G. O. Ong'ondo. 2020.** Parasite Communities of *Oreochromis niloticus baringoensis* (Trewavas, 1983) in Relation to Selected Water Quality Parameters in the Springs of Lorwai Swamp and Lake Baringo, Kenya. *Acta Parasitologica*, 65(2):441–451. DOI: <https://doi.org/10.2478/s11686-020-00178-2>
- Biswal D. 2020.** Fish parasites as Biological Indicators: A Systematic Review. *Ichthyological Communication*, 13(4):1743-1755. DOI: <http://dx.doi.org/10.21786/bbrc/13.4/16>
- Briones-Pérez, E., E. Hernández-Acosta, A.I., Leal-Mendoza & C.I., Calvario-Rivera. 2017.** La calidad del agua en diferentes unidades de producción acuícola de Tlaxcala, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 4(5):40-48.
- Chidiac, S., P. Najjar, N. Ouaini, Y. El-Rayess & D.E. Azzi. 2023.** A comprehensive review of water quality indices (WQIs): history, models, attempts and perspectives. *Rev Environ Sci Biotechnol* 22, 349–395.
- CONAPESCA (Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca). 2018.** Sanidad en producción acuícola, garantía de seguridad alimentaria. Disponible en: <https://www.gob.mx/conapesca/articulos/sanidad-en-produccion-acuicola-garantia-de-seguridad-alimentaria-172882>
- Cornejo, T. & G. C. Heberd. 2022.** Revisión sistemática: líquenes epífitos como bioindicadores eficientes y adaptables de la calidad del aire. Tesis de Licenciatura. Universidad Cesar Vallejo. Perú.
- Costa, A.P.T. & F. Schneck. 2022.** Diatoms as indicators in running waters: trends of studies on biological assessment and monitoring. *Environment Monitoring Assess*, 194(695):1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10383-3>
- Dey, J. & R. Vijay. 2021.** A critic and intensive review on assessment of water quality parameters through geospatial techniques. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1):41612-41626. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14726-4>
- Domínguez, E. & D.N. Adonis-Giorgi. 2020.** Los indicadores biológicos como herramientas de la Calidad del agua. Pp: 19-25 In: La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina: Bases para el análisis de la integridad ecológica. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.
- Ebert, D. 2022.** Daphnia as a versatile model system in ecology and evolution. *EvoDevo*, 13(16):1-13. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13227-022-00199-0>
- García-Medel, D. 2022.** Seguridad alimentaria: retos y desafíos de la acuicultura en México. *Journal of Behavior and Feeding* 2(2):10-19. DOI: <https://doi.org/10.32870/jbf.v2i2.31>
- González, M.E., A. Rengifo, D.P. Piñeros-Marín & L.M. Buitrago-Ramírez. 2023.** Reconocimiento de algas, protozoos y metazoos como bioindicadores ambientales. Avances y desafíos en las ciencias y la ingeniería. Pp: 207-220. In: Gómez-Meneses, F.C., L. M. Gómez-Melo, D. Valencia-Enríquez, S. Gómez-Herrera, J. M. López-Moreno & J. M. Villota-Paz. (ed.) Avances y desafíos en las ciencias y la ingeniería: nuevos conocimientos para un futuro sostenible. UNIMAR. Colombia.
- Grano-Maldonado, M.I. & G. Pérez-Ponce de León. 2023.** Gusanos parásitos en vertebrados de Sinaloa, ¿Qué tanto sabemos de ellos? SIBIUS Revista de la Dirección General de Bibliotecas. 1(1):28-38.
- López-Acopa, N.J., R.C. Antonio-Cruz, N. Méndez-de los Santos, K. M. Jesús-de la Cruz & M.J. Romellón-Cerino. 2023.** Evaluación de los parámetros para la calidad del agua en el cultivo de Tilapia. *Revista IPSUMTEC* 6(5):52-59.
- Martínez-Cordero, F.J., T. S. Delgadillo, E. Sánchez-Zazueta & J. Cai. 2021.** Tilapia aquaculture in México: assessment with a focus on social and economic performance. FAO Fisheries and Aquaculture Circular, Roma, 68 pp.
- Minich, J. J., Q. Zhu, Z.Z. Xu, A. Amor, M. Ngochera, M. Simwaka, E. E. Allen, H. Zidana & R. Knight. 2018.** Microbial effects of livestock manure fertilization on freshwater aquaculture ponds rearing tilapia (*Oreochromis shiranus*) and North African catfish (*Clarias gariepinus*). *Microbiology*

Open. 7(6):1-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/mbo3.716>

frwa.2021.662765

**Monge-Quevedo, A.** 2022. La acuicultura de baja escala como respuesta ante el deterioro social, económico y ambiental de la zona rural. Pp: 42-63 In: Pesca y acuicultura en el noroeste de México, un enfoque multidisciplinario. Universidad Autónoma de Baja California Sur, México.

**Wanja, D. W., P. G. Mbuthia, R. M. Waruiru, J. M. Mwadime, L. C. Bebora, P.N. Nyaga & H. A. Ngowi.** 2020. Fish Husbandry Practices and Water Quality in Central Kenya: Potential Risk Factors for Fish Mortality and Infectious Diseases. *Veterinary Medicine International*, 1(7461):1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/6839354>

**Norzagaray-Campos, M., P. Muñoz-Sevilla, L. Sánchez-Velasco, L. Capurro-Filograsso & O. Llánes-Cárdenas.** 2012. Acuacultura: estado actual y retos de la investigación en México. *AquaTIC* 1(37):20-25.

**Ojwala, R. A., E. O. Otachi & N.K. Kitaka.** 2018. Effect of water quality on the parasite assemblages infecting Nile tilapia in selected fish farms in Nakuru County, Kenya. *Parasitology Research*, 117(11):3459-3471. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00436-018-6042-0>

**Paredes-Trujillo, A. & M. Mendoza-Carranza.** 2022. Sobre el cultivo de tilapia relación entre enfermedades y calidad del agua. *Revista Latinoamericana de Difusión Científica*.

**Platas-Rosado, D.** 2018. Importancia económico y social del sector acuícola en México. *Agro Productividad* 10(2):19-24.

**Rojas-Pantoja, E., E. Valer-Pacheco, M. Páez-Rodríguez & O. Méndez.** 2023. Helmintos parásitos del pez conejo *Lagocephalus laevigatus* (Linnaeus, 1766) en Chachalacas, Veracruz. *Revista Biológica Agropecuaria Tuxpan*, 11(1):67-78. DOI: <https://doi.org/10.47808/revistabioagro.v11i1.461>

**SAGARPA (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación).** 2022. Acuicultura en México. Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-en-mexico?idiom=es>

**Serafín-Muñoz, A.H., A. Guerrero-Aguilar, U.E. Rodríguez-Castrejón, C. Schuth & B. Noriega-Luna.** 2022. Bioindicadores y biomonitorización: Revisión de las metodologías aplicadas en las masas de agua y su uso durante la pandemia de Covid-19. *Acta Universitaria*, 1(32):1-26. DOI: <https://doi.org/10.15174/au.2022.3388>

**Tampo, L., I. Kaboré, E.H. Alhassan, A. Oueda, L.M. Bawa & G. Djaneye-Boundjou.** 2021. Benthic Macroinvertebrates as Ecological Indicators: Their sensitivity to the Water Quality and human disturbances in Tropical River. *Front Water*, 1(3):1-17. DOI: <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.662765>