

Artículo de revisión

Residuos de antibióticos veterinarios de la ganadería presentes en el recurso hídrico: una revisión sistemática de su ocurrencia, fuentes de contaminación e implicancias ambientales

Veterinary antibiotic residues from livestock in water resources: a systematic review of their occurrence, sources of contamination, and environmental implications

Joshua Efrain Ramirez-Guevara^a  Cristian Hurtado-Burga^a  Ian Moises Chavez-Melendez^{a,b*}  Lucía Ines Rodriguez-Meléndez^{a,b} 

^aEscuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería Ambiental, Biosistemas y de la Energía (FIABE), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Calle Higos Urco 302, Chachapoyas, Amazonas, Perú.

^bInstituto de Investigación en Ingeniería Ambiental (INAM), Facultad de Ingeniería Ambiental, Biosistemas y de la Energía (FIABE), Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Chachapoyas 01001, Perú

***Autor de correspondencia:**
Ian M. Chavez, email: ianmoises36@gmail.com

Historial del artículo

Recibido: 20 de julio del 2026
Aceptado: 07 de setiembre del 2026
Publicado: 18 de setiembre del 2026

RESUMEN

Los antibióticos veterinarios son considerados contaminantes emergentes por su persistencia ambiental y su potencial para inducir resistencia antimicrobiana en ecosistemas acuáticos. Este estudio tuvo como objetivo sintetizar la evidencia científica sobre la ocurrencia de residuos de antibióticos veterinarios en recursos hídricos asociados a la ganadería, sus fuentes de contaminación y sus implicancias ambientales. Se realizó una revisión sistemática siguiendo la metodología PRISMA, con búsquedas en Scopus y Web of Science; tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión se seleccionaron 55 artículos. Los resultados evidenciaron una amplia distribución de antibióticos en aguas superficiales, residuales y subterráneas, siendo las sulfonamidas, fluoroquinolonas, β -lactámicos, macrólidos y tetraciclinas las familias más reportadas. Los efluentes pecuarios y el almacenamiento de estiércol/purín constituyeron las principales fuentes de contaminación, mientras que la escorrentía superficial y la lixiviación/infiltración representaron las rutas predominantes de transporte hacia los cuerpos de agua. Entre las implicancias ambientales, la resistencia antimicrobiana fue el efecto ampliamente dominante, seguida por afectaciones sobre la fauna acuática, la flora/microalgas y, en menor medida, la bioacumulación. Los hallazgos confirman que la actividad ganadera desempeña un papel importante en la dispersión de antibióticos en los recursos hídricos, evidenciando la necesidad de fortalecer las estrategias de monitoreo y gestión ambiental para mitigar sus riesgos ecológicos y sanitarios.

Palabras clave: Antibiótico; Contaminante emergente; Ganadería; Impacto ambiental; Recursos hídricos.

ABSTRACT

Veterinary antibiotics are considered emerging pollutants due to their environmental persistence and their potential to induce antimicrobial resistance in aquatic ecosystems. This study aimed to synthesize the available scientific evidence on the occurrence of veterinary antibiotic residues in water resources associated with livestock farming, their sources of contamination, and their environmental implications. A systematic review was conducted following the PRISMA methodology, with searches in Scopus and Web of Science; after applying the inclusion and exclusion criteria, 55 articles were selected. The results showed a widespread distribution of antibiotics in surface, wastewater, and groundwater, with sulfonamides, fluoroquinolones, β -lactams, macrolides, and tetracyclines being the most frequently reported classes. Livestock effluents and manure/slurry storage were the main sources of contamination, while surface runoff and leaching/infiltration were the predominant transport routes to water bodies. Among the environmental implications, antimicrobial resistance was by far the dominant effect, followed by effects on aquatic fauna, flora/microalgae, and, to a lesser extent, bioaccumulation. The findings confirm that livestock farming plays an important role in the dispersion of antibiotics into water resources, highlighting the need to strengthen environmental monitoring and management strategies to mitigate their ecological and health risks.

Keywords: Antibiotic, Emerging contaminant, Environmental impact, Livestock farming, Water resources.

INTRODUCCIÓN

El análisis de contaminantes emergentes en recursos hídricos ha cobrado una relevancia creciente en el ámbito de la investigación ambiental debido a sus implicancias ecológicas y sanitarias. Dentro de este grupo, los antibióticos veterinarios destacan por su capacidad para persistir en el ambiente y generar efectos indirectos sobre los ecosistemas, particularmente mediante la selección de resistencia antimicrobiana y la alteración de las comunidades microbianas (Menz et al., 2019; Niegowska et al., 2021). Esta problemática adquiere especial importancia en sistemas asociados a la actividad ganadera, donde la interacción entre las prácticas productivas y el medio ambiente favorece la movilización de estos compuestos hacia los recursos hídricos. En ese sentido, se trata de una situación que representa un desafío significativo para la gestión ambiental, considerando que la dinámica y los efectos de estos contaminantes aún no se comprenden completamente a escala global (Zainab et al., 2020).

En el contexto de la ganadería, la administración intensiva de antibióticos provoca que una fracción importante de estos compuestos no sea metabolizada por completo y sea excretada a través de heces y orina. Posteriormente, estos residuos pueden ingresar al ambiente cuando los estiércoles se aplican como fertilizante o cuando los efluentes pecuarios son descargados sin un tratamiento adecuado en sistemas superficiales y subterráneos (Robles-Jiménez et al., 2022). Una vez incorporados a los cuerpos de agua, la persistencia de estos residuos y la limitada capacidad de los tratamientos convencionales para eliminarlos completamente favorecen su clasificación como contaminantes emergentes de alta preocupación ambiental, debido a que ejercen presión selectiva sobre las comunidades microbianas y contribuyen a la propagación de bacterias resistentes y genes de resistencia antimicrobiana (Menz et al., 2019). Además, la exposición crónica a estas sustancias puede alterar la diversidad microbiana y comprometer la integridad ecológica de los ecosistemas acuáticos, con implicancias negativas sobre la fauna y flora asociadas (Niegowska et al., 2021; Albarano et al., 2024).

A pesar del creciente número de investigaciones sobre antibióticos en el ambiente, la evidencia disponible presenta limitaciones importantes en términos de integración y sistematización. En general, los estudios existentes suelen abordar aspectos específicos; como la detección, el transporte o los efectos; de manera aislada, lo que dificulta la construcción de una visión integral del problema (Robles-Jiménez et al., 2022). A ello se suman las diferencias en metodologías, escalas de análisis y contextos geográficos, las cuales generan heterogeneidad en los resultados reportados y limitan tanto la comparabilidad entre estudios como la identificación de patrones consistentes. Esta fragmentación del conocimiento constituye una barrera

para el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación y control. En consecuencia, la evidencia científica disponible sobre la ocurrencia, las rutas de contaminación y los efectos ambientales de los antibióticos veterinarios en recursos hídricos vinculados a la ganadería continúa dispersa, lo que limita una comprensión integral del problema y dificulta la formulación de respuestas basadas en evidencia (Rosato et al., 2025; Zainab et al., 2020).

Bajo este contexto, el presente artículo de revisión tiene como propósito analizar, mediante una revisión sistemática, la ocurrencia de residuos de antibióticos veterinarios en recursos hídricos asociados a la ganadería y sus implicancias ambientales. De manera específica, se busca (i) identificar la presencia y distribución de estos compuestos en aguas superficiales, subterráneas y residuales; (ii) determinar las principales fuentes y vías de contaminación hacia el recurso hídrico; y (iii) evaluar los riesgos ambientales asociados.

Para guiar este análisis, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es la ocurrencia, las fuentes de contaminación y las implicancias ambientales de los residuos de antibióticos veterinarios en recursos hídricos a nivel global? La respuesta a esta interrogante permitirá sintetizar críticamente el conocimiento existente, identificar vacíos de investigación y aportar evidencia útil para la toma de decisiones orientadas a la gestión sostenible del agua y al control de esta contaminación (Menz et al., 2019; Robles-Jiménez et al., 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia de búsqueda

Este estudio realizó una revisión de artículos científicos con un enfoque específico en la contaminación por antibióticos de las fuentes de agua para resaltar las tendencias actuales en el campo de investigación abordado. El proceso de revisión se llevó a cabo a través de una serie de pasos: identificación, selección, elegibilidad e inclusión. En primer lugar, los estudios relevantes se identificaron sistemáticamente utilizando la base de datos Scopus y WOS, junto con filtros para artículos originales y búsqueda publicados en idioma inglés. La selección de la base de datos se basó en la indexación de estudios de alta calidad relacionados con la contaminación de agua por antibióticos en la ganadería intensiva. La búsqueda se realizó utilizando palabras clave y operadores booleanos, como "AND" para conectar palabras clave y "OR" para separarlas, teniendo como resultado la fórmula de búsqueda para Scopus, TITLE-ABS-KEY (("veterinary antibiotic*" OR antibiotic*) AND (livestock OR "animal husbandry" OR "intensive livestock" OR "intensive animal farming") AND (wastewater OR groundwater OR "surface water" OR "water resources") AND (contamination OR pollution OR residues OR "environmental impact")) y para WOS, ("veterinary antibiotic*" OR antibiotic*) AND (livestock

OR "animal husbandry" OR "intensive livestock" OR "intensive animal farming") AND (wastewater OR groundwater OR "surface water" OR "water resources") AND (contamination OR pollution OR residues OR "environmental impact"). Las palabras clave de búsqueda incluyeron: antibiótico, contaminante emergente, ganadería, impacto ambiental, recursos hídricos.

Posteriormente, se realizaron evaluaciones de selección y elegibilidad de los estudios identificados para verificar y validar el contenido de las investigaciones, asegurando que los estudios cumplieran con los criterios de inclusión específicos (Tabla 1). Se revisaron los títulos y resúmenes antes del análisis del texto completo.

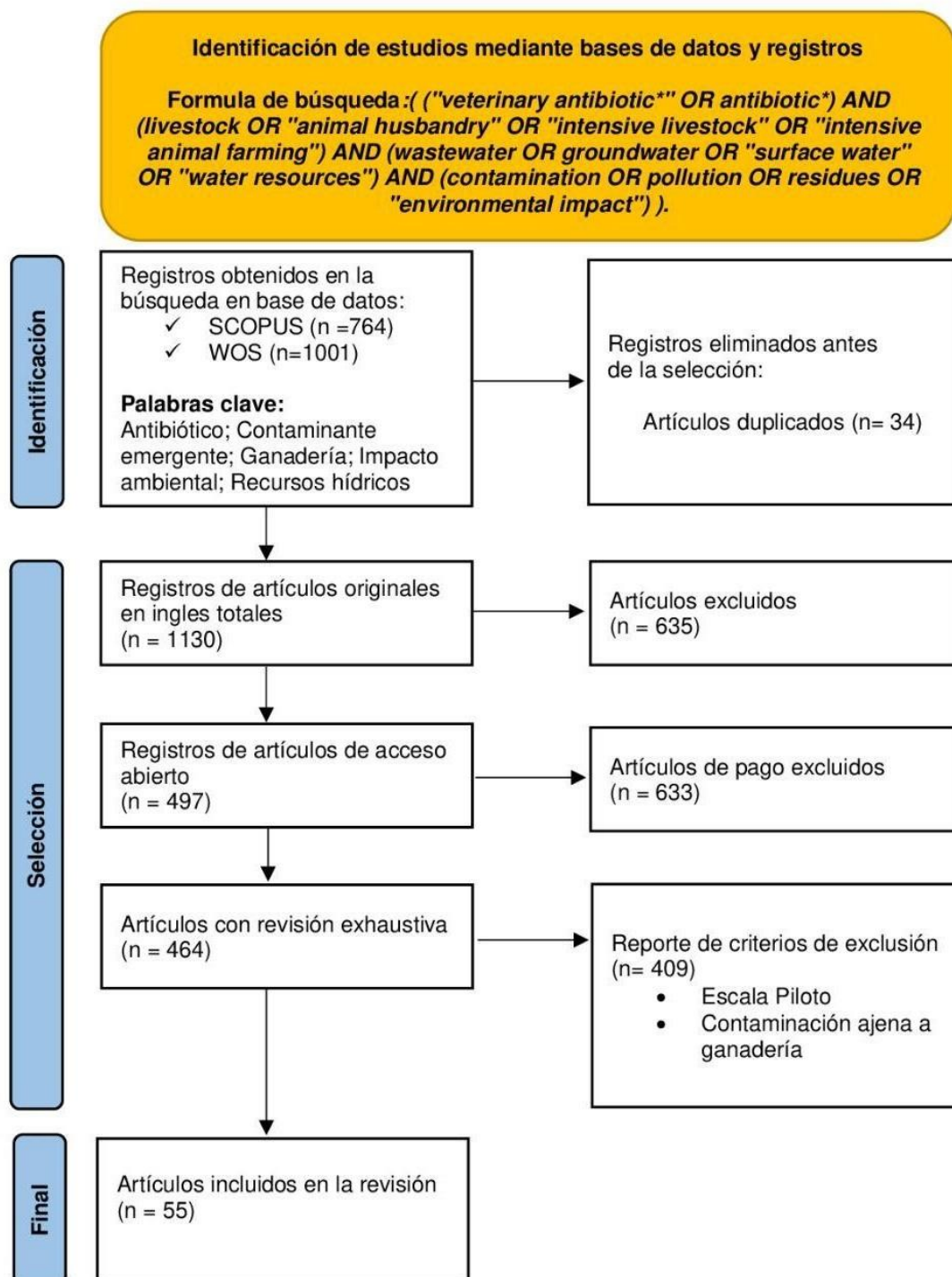


Figura 1. Esquema de procedimiento PRISMA.

Criterios de inclusión y exclusión

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión utilizados en la revisión sistemática.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Estudios que analicen la contaminación del recurso hídrico asociada a la actividad ganadera.	Estudios sin libre acceso
Artículos científicos publicados en revistas indexadas y revisados por pares.	Investigaciones desarrolladas exclusivamente a escala piloto o de laboratorio.
Publicaciones redactadas en idioma inglés.	Estudios enfocados en fuentes de contaminación ajenas a la actividad ganadera.
Investigaciones que evalúen impactos ambientales en cuerpos de agua.	Estudios que no presenten datos originales sobre la ocurrencia o los efectos ambientales.

Extracción y sistematización de datos

Para garantizar una síntesis homogénea y reproducible de la información, se diseñó una matriz de extracción de datos que permitió registrar de manera estructurada las variables de interés de cada estudio incluido. Las variables consideradas fueron las siguientes:

Identificación del estudio: Título del artículo, palabras clave, DOI, año de publicación, país donde se realizó el estudio, nombre de la revista y número de citas, (como indicador de impacto o relevancia).

Fuentes primarias y matriz hídrica evaluada: Tipo de fuente de contaminación asociada a la actividad ganadera (ej. estiércol, efluentes, escorrentía) y matriz ambiental muestreada (agua superficial, subterránea, residual, sedimentos, etc.).

Método de detección: Técnica analítica empleada para la identificación y cuantificación de antibióticos (ej. cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas, LC-MS/MS).

Antibióticos identificados: Nombres de los compuestos detectados agrupados por familias si la información se encuentra disponible.

Vías de transporte: Mecanismos de movilización de los antibióticos hacia el recurso hídrico (ej. lixiviación, escorrentía superficial).

Implicancias ambientales: Efectos reportados sobre los ecosistemas acuáticos, incluyendo generación de resistencia antimicrobiana, bioacumulación, afectación a la fauna acuática o a la flora y microalgas.

La extracción fue realizada de forma independiente por todos los autores, y las discrepancias se resolvieron mediante consenso. Esta matriz constituyó la base para el análisis descriptivo y la síntesis cualitativa de los resultados preliminares y fue depositada en el repositorio público Figshare (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.33438679>).

RESULTADOS

Se identificaron inicialmente un total de 764 artículos en la base de datos Scopus y 1001 artículos en la base de datos de WOS. Tras la aplicación de filtros por tipo de documento (artículos de investigación), el número se redujo a 1130 estudios, y posteriormente, al aplicar el criterio de acceso abierto, se seleccionaron 497 artículos para su evaluación preliminar. Finalmente, al aplicar los criterios de inclusión y exclusión se encontraron 55 artículos que cumplen con nuestros criterios.

A partir del análisis inicial de la matriz de datos, se observó que los estudios seleccionados presentan una distribución temporal reciente, concentrándose principalmente entre los años 2018 y 2026 (Figura 2a), y una cobertura geográfica diversa que incluye países de Europa y Asia, tales como Países Bajos, España y China (Figura 2b). Asimismo, las investigaciones se presentan diferentes palabras claves, siendo las más representativas “antibiotics”, “groundwater”, “antibiotic resistance genes” y “livestock” (Figura 2C).

En relación con las fuentes de información, se identificó que los estudios emplearon principalmente metodologías de muestreo de aguas superficiales, subterráneas y matrices asociadas como estiércol, así como modelos integrados a escala de cuenca y análisis mediante técnicas cromatográficas avanzadas (LC-MS/MS). De manera preliminar, se evidenció la detección de antibióticos en diferentes matrices ambientales, destacando la presencia de compuestos como sulfonamidas, fluoroquinolonas, tetraciclinas y macrólidos.

En cuanto a la ocurrencia, se observó que varios estudios reportaron la presencia de antibióticos en aguas subterráneas y superficiales, incluso en concentraciones bajas (ng/L), con una alta frecuencia de detección en sistemas asociados a la aplicación de estiércol como fertilizante. Asimismo, se identificaron diferencias en la distribución de los contaminantes, donde las sulfonamidas predominan en aguas subterráneas debido a

su alta movilidad, mientras que las fluoroquinolonas presentan mayor contribución en aguas superficiales.

Respecto a las vías de contaminación, los resultados preliminares evidenciaron que la lixiviación desde suelos agrícolas, la escorrentía superficial y el manejo inadecuado de estiércol constituyen los principales mecanismos de ingreso de antibióticos al recurso hídrico. En este sentido, algunos estudios señalaron que las prácticas de gestión agrícola pueden generar efectos contrapuestos, reduciendo la contaminación en ríos pero incrementando la carga en aguas subterráneas.

En términos de implicancias ambientales, se identificó de manera preliminar que la presencia de estos compuestos está asociada con la persistencia en el ambiente, la generación de resistencia antimicrobiana, la alteración de comunidades microbianas y efectos adversos sobre organismos acuáticos, incluyendo alteraciones en el crecimiento, desarrollo y supervivencia. Estos hallazgos evidencian la amplia distribución de los antibióticos veterinarios en los recursos hídricos y la complejidad de sus efectos, lo que justifica la necesidad de un análisis sistemático más detallado en etapas posteriores de la investigación.

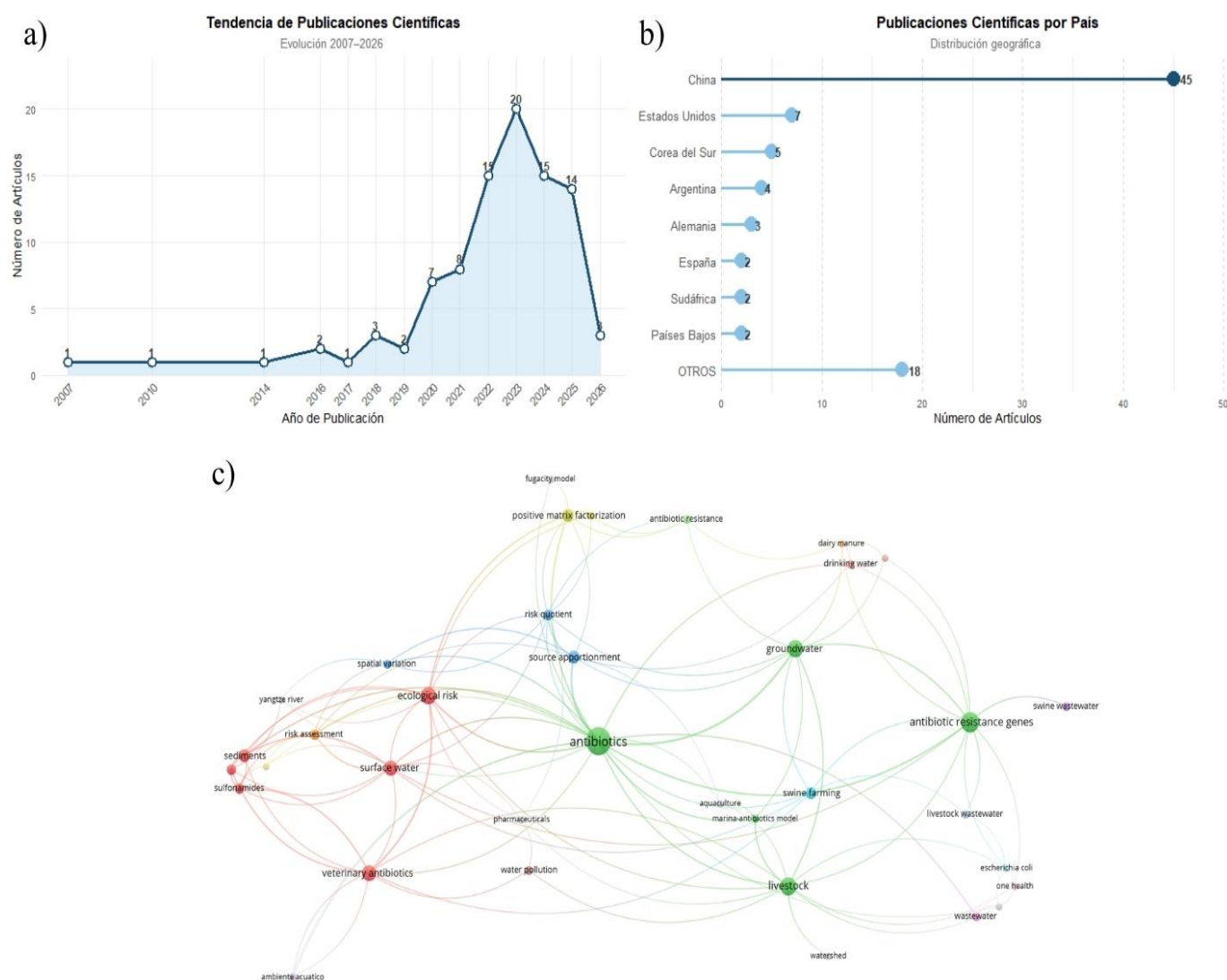


Figura 2. Principales resultados del análisis bibliométrico de la literatura científica sobre antibióticos en recursos hídricos asociados a la actividad pecuaria. (a) Tendencia anual de publicaciones científicas durante el período 2007–2026. (b) Distribución de las publicaciones por país de afiliación del autor correspondiente. (c) Red de coocurrencia de palabras clave construida mediante VOS-viewer, donde el tamaño de los nodos es proporcional a la frecuencia de aparición de las palabras clave, el grosor de los enlaces representa la fuerza de asociación entre ellas y los colores identifican los diferentes clústeres temáticos.

Presencia de antibióticos en el recurso hídrico

La presencia de antibióticos en los recursos hídricos constituye una problemática ambiental emergente debido a que, una vez introducidos al ambiente, los antibióticos pueden distribuirse entre diferentes compartimentos acuáticos, incluyendo aguas superficiales, sedimentos y aguas subterráneas, donde persisten y pueden generar efectos adversos sobre los ecosistemas acuáticos (Qadeer et al., 2023). Asimismo, las actividades de producción animal han sido identificadas como una de las principales fuentes de contaminación por antibióticos en los sistemas fluviales, contribuyendo significativamente a la presencia y distribución de estos compuestos en los cuerpos de agua (Hu et al., 2023).

La figura 3 muestra la distribución y co-ocurrencia de los tipos de recursos hídricos evaluados en los 36 artículos analizados

sobre antibióticos veterinarios. Los ríos fueron el recurso hídrico más estudiado, con 21 investigaciones, seguidos por los sedimentos (12 estudios) y las aguas residuales (8 estudios). En menor proporción se reportaron estudios en lagos y lagunas (4), agua potable (3) y agua subterránea (2).

Asimismo, la matriz evidencia que varios estudios analizaron simultáneamente más de un tipo de recurso hídrico. La mayor co-ocurrencia se observó entre ríos y sedimentos (6 estudios), seguida de ríos y aguas residuales (6 estudios), así como ríos y lagos/lagunas (3 estudios). Estas asociaciones reflejan la estrecha conexión entre los diferentes compartimentos acuáticos y sugieren que los antibióticos pueden transportarse y acumularse a lo largo del sistema hídrico.

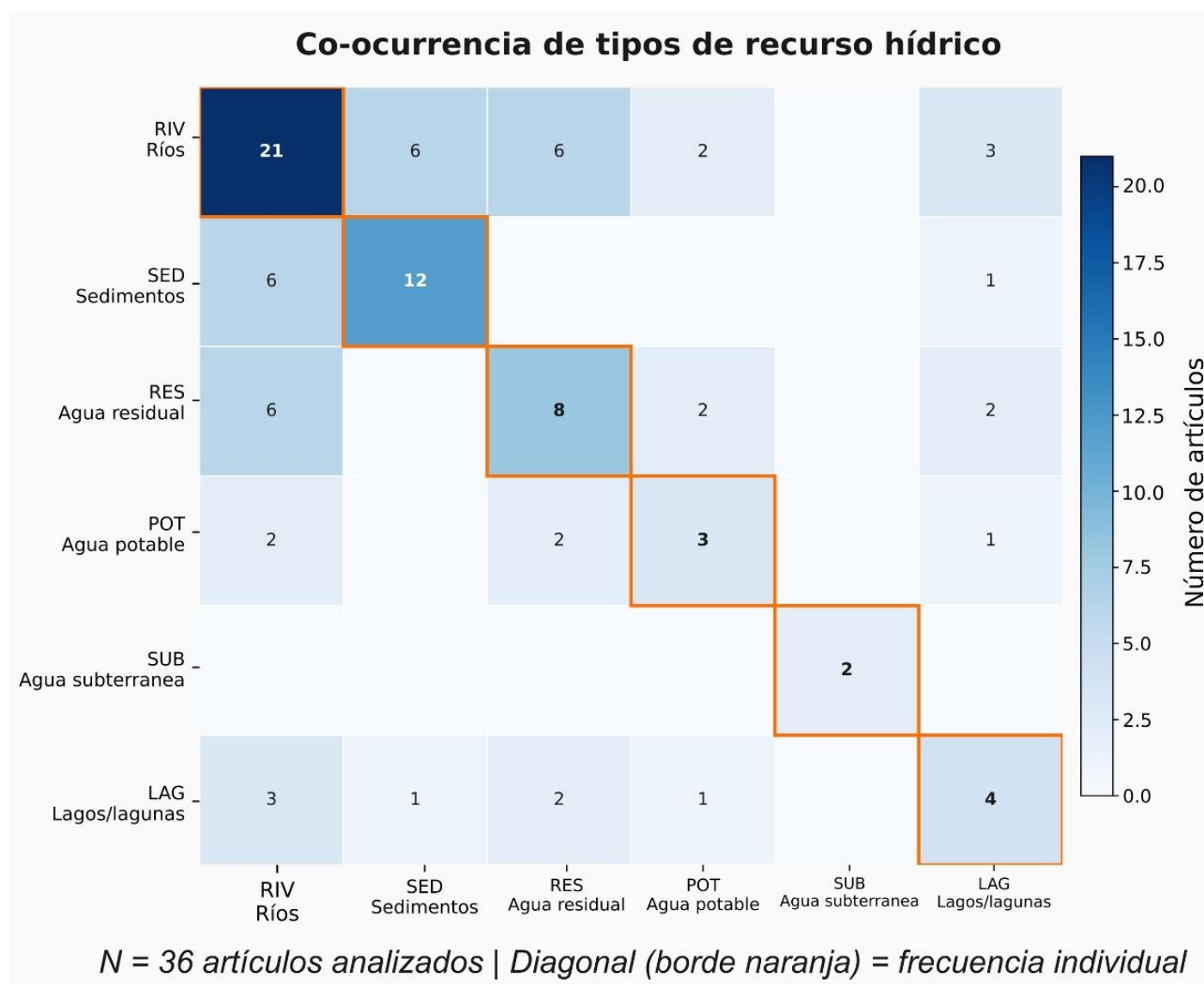


Figura 3. Co-ocurrencia de tipos de recurso hídrico.

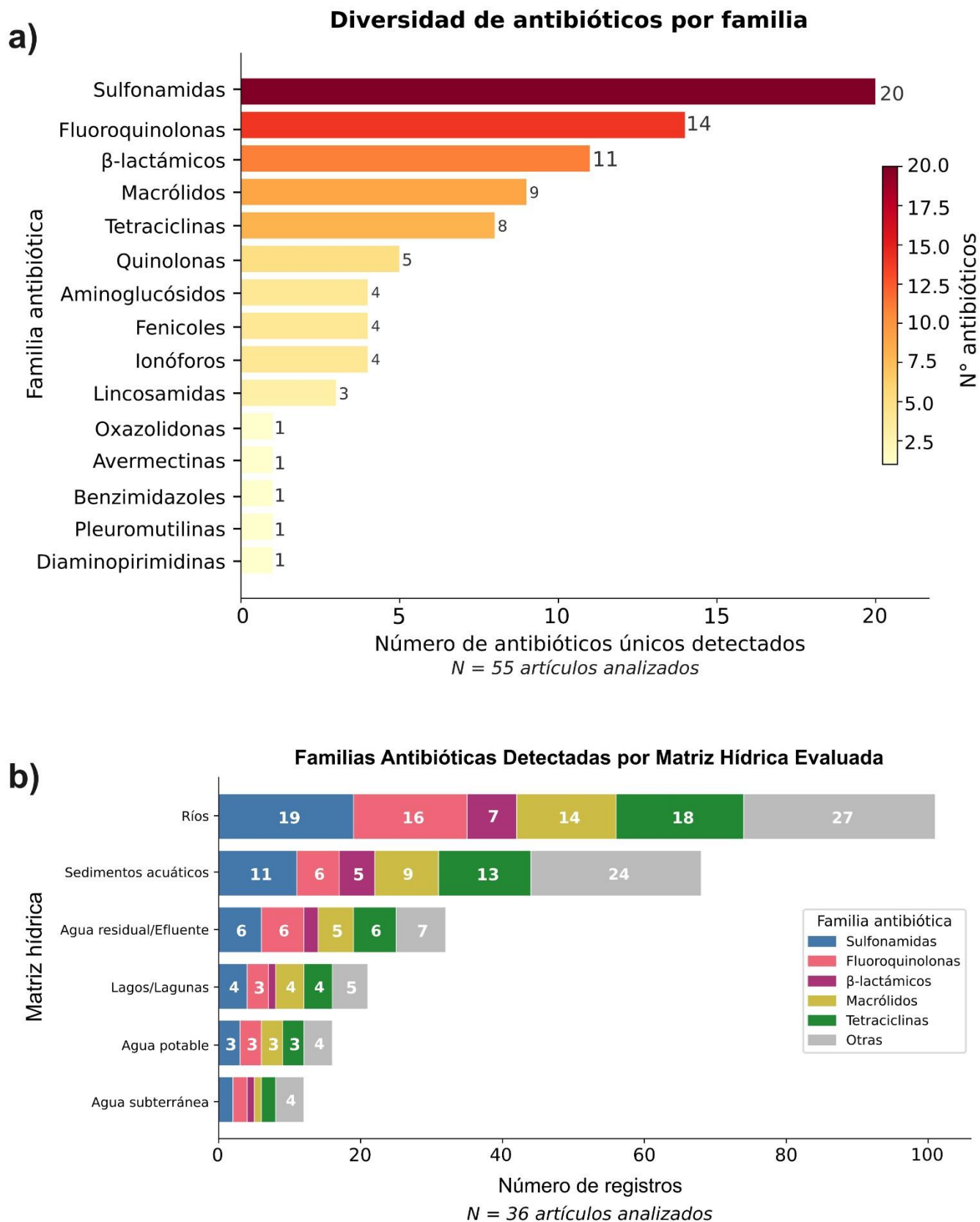


Figura 4. Clasificación general de las familias de antibióticos identificadas en la literatura (a) y su prevalencia en diferentes matrices hídricas (b).

La distribución de las familias de antibióticos reportadas en los estudios mostró un predominio de las sulfonamidas, presentes en 20 artículos, seguidas de las fluoroquinolonas (14), β -lactámicos (11), macrólidos (9) y tetraciclinas (8). Las quinolonas fueron reportadas en 5 artículos, mientras que aminoglucósidos, fenicoles e ionóforos estuvieron presentes en 4 artículos cada uno; las lincosamidas fueron registradas en 3 artículos y las oxazolidonas, avermectinas, benzimidazoles, pleuromutilinas y diaminopirimidinas en un artículo cada una (Figura 4a).

Al considerar únicamente los estudios que vincularon la presencia de antibióticos con una matriz hídrica específica ($n = 36$), los ríos concentraron el mayor número de registros, con 19 artículos para sulfonamidas, 18 para tetraciclinas, 16 para fluoroquinolonas, 14 para macrólidos y 7 para β -lactámicos. En los sedimentos acuáticos se registraron 13 artículos para tetraciclinas, 11 para sulfonamidas, 9 para macrólidos, 6 para fluoroquinolonas y 5 para β -lactámicos. Las aguas residuales/efluentes, lagos o lagunas, agua potable y aguas subterráneas presentaron un menor número de registros (Figura 4b).

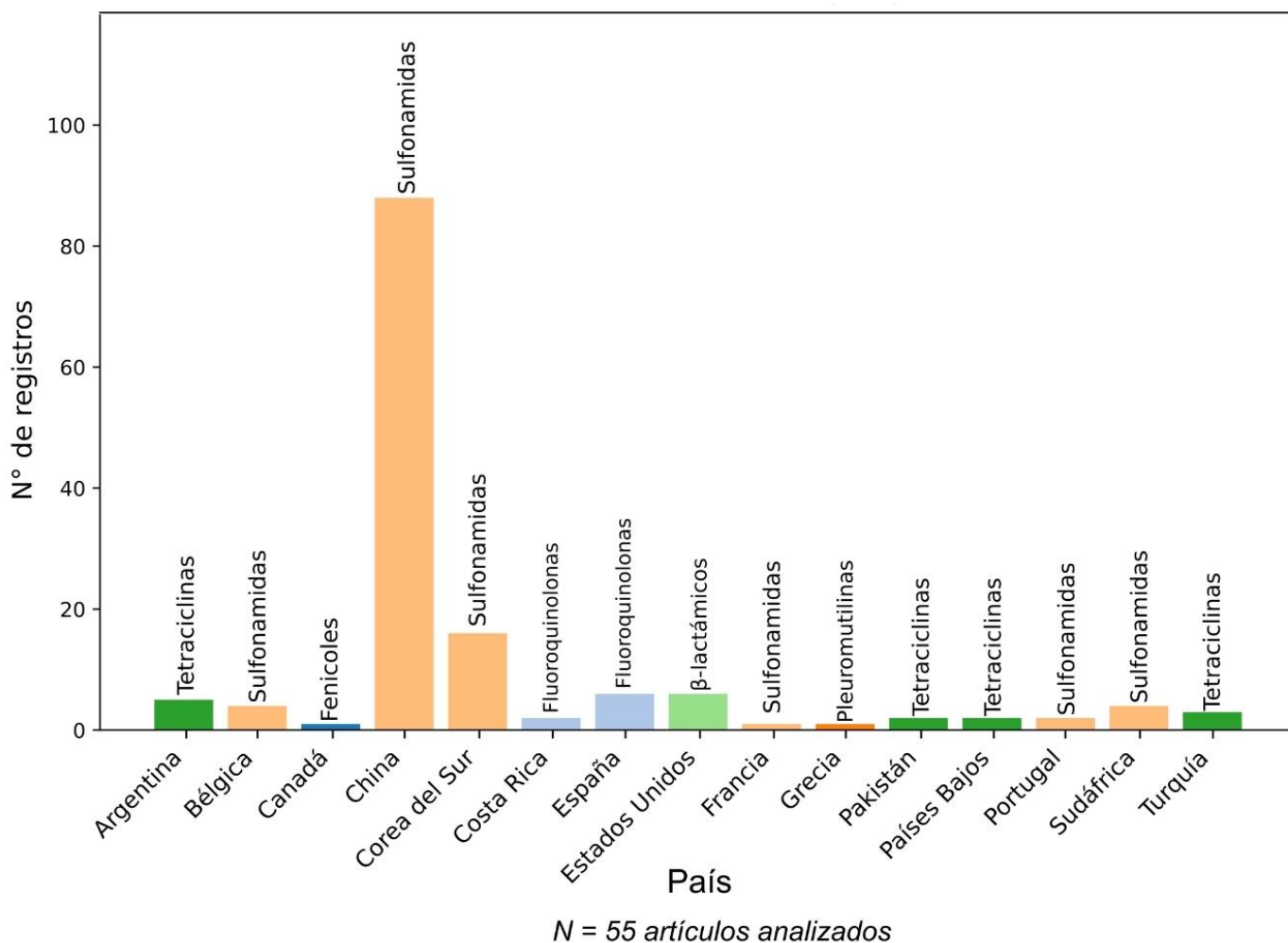


Figura 5. Distribución de registros de antibióticos por país y familia farmacológica en los estudios incluidos en la revisión.

Metodologías de detección y extracción

Las técnicas de detección y extracción empleadas en los estudios incluidos en la revisión muestran un claro predominio de metodologías cromatográficas. Entre las técnicas de detección, LC-MS/MS fue la más frecuentemente reportada ($n = 15$), seguida de HPLC-MS/MS ($n = 14$) y UPLC-MS/MS ($n = 12$). Asimismo, se reportaron UHPLC-MS/MS ($n = 7$), qPCR ($n = 4$),

UHPLC-HRMS ($n = 3$), WGS y HPLC ($n = 2$ en ambos casos), mientras que UHPLC-QTOF/MS y CF presentaron una menor frecuencia de reporte ($n = 1$ en ambos casos). En cuanto a las técnicas de extracción, SPE presentó un marcado predominio ($n = 51$), seguida de UE ($n = 3$), mientras que PLE y ASE fueron reportadas en un estudio cada una ($n = 1$). En conjunto,

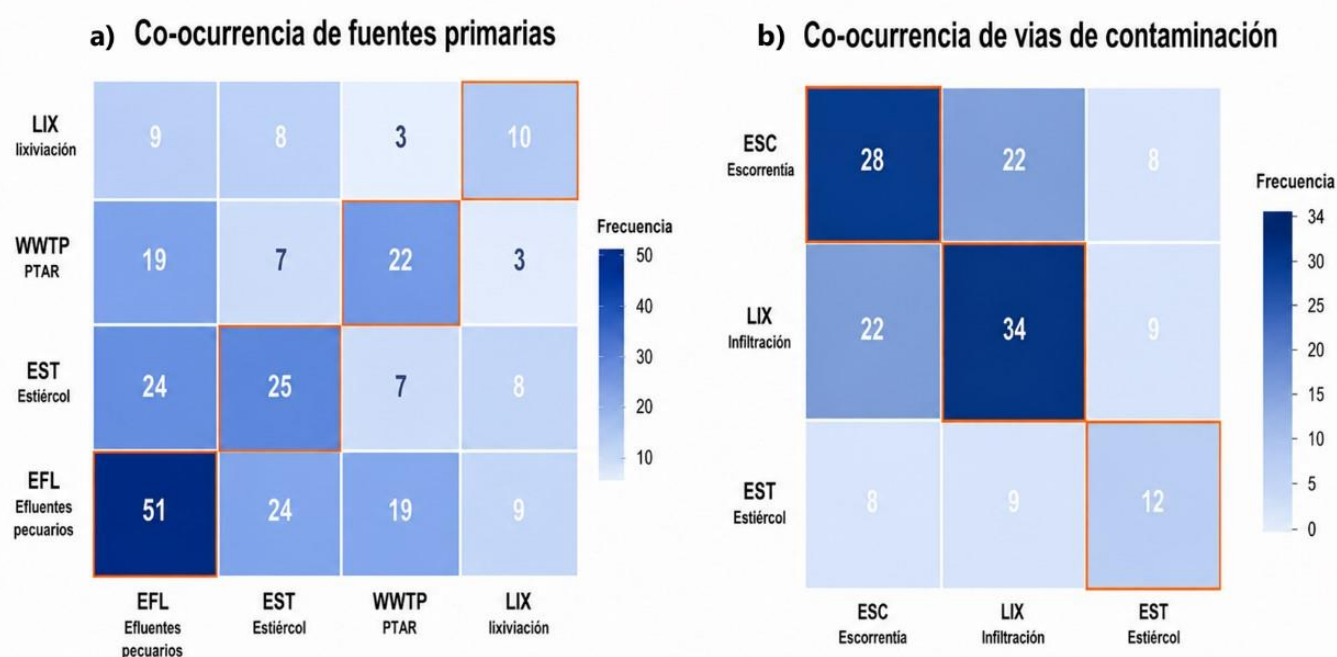
los resultados evidencian un predominio de técnicas cromatográficas acopladas a espectrometría de masas para la detección y de SPE como principal metodología de extracción en los estudios evaluados (Tabla 2).

Fuentes y vías de contaminación

Los efluentes pecuarios y el estiércol/purín constituyeron las fuentes de contaminación más frecuentemente reportadas, presentando además la mayor co-ocurrencia entre categorías ($n = 24$). También se observaron asociaciones importantes entre los efluentes pecuarios y las aguas residuales tratadas ($n = 19$), mientras que las fuentes relacionadas con procesos de lixiviación registraron una menor frecuencia de aparición (Figura 6a). Por otro lado, la escorrentía ($n = 28$), el estiércol ($n = 12$) y los lixiviados ($n = 34$) fueron las principales vías de movilización de antibióticos hacia los recursos hídricos. Las asociaciones más frecuentes correspondieron a escorrentía–estiércol ($n = 8$), escorrentía–lixiviados ($n = 22$) y estiércol–lixiviados ($n = 9$), evidenciando la importancia de los procesos hidrológicos en el transporte de estos contaminantes (Figura 6b).

Implicancias ambientales y riesgos asociados

El estudio también evaluó las implicancias ambientales que representan los antibióticos provenientes de las actividades ganaderas. La presencia de antibióticos en los recursos hídricos se ha convertido en una preocupación ambiental emergente debido a su liberación continua desde actividades humanas como la medicina, la ganadería, la acuicultura y las industrias farmacéuticas (Okoye et al., 2022). Estos compuestos ingresan a ríos, lagos y aguas subterráneas a través de aguas residuales domésticas, hospitalarias y agrícolas, donde persisten y generan efectos negativos sobre los ecosistemas acuáticos (Felis et al., 2020). Entre las principales implicancias ambientales destacan la alteración de microorganismos y organismos acuáticos, la bioacumulación en cadenas tróficas y, especialmente, la promoción de la resistencia antimicrobiana (ARG), considerada una de las mayores amenazas para la salud pública y ambiental a nivel mundial (Gangar & Patra, 2023).



N=55 artículos analizados | Diagonal (borde naranja)=frecuencia individual

Figura 6. Frecuencia de investigación y co-ocurrencia entre fuentes de emisión de contaminación (a) y rutas de movilización ambiental (b) de antibióticos veterinarios en el entorno hídrico.

Dominancia de implicancias ambientales



N = 43 artículos analizados

Figura 7. Dominancia de implicancias ambientales.

El estudio demostró que la distribución de las principales implicancias ambientales identificadas sobre antibióticos en recursos hídricos ($N = 43$ artículos analizados) está dominada por la resistencia antimicrobiana (ARG) con 39 estudios (90.7%), evidenciando que la generación y dispersión de genes resistentes es el impacto más reportado. En segundo lugar, se encontró la afectación de la fauna acuática con 8 estudios (18.6%), seguido de las afecciones presentes en la flora acuática (6.9%), y finalmente la bioacumulación siendo la menos reportada con 1 estudio (2.3%). En conjunto, la figura 7 evidencia que las investigaciones se enfocan principalmente en los riesgos asociados a la resistencia antimicrobiana, aunque también se reconocen efectos ecológicos importantes sobre los organismos y ecosistemas acuáticos.

DISCUSIÓN

El elevado número de investigaciones concentradas en China (45 estudios) refleja el uso intensivo de antibióticos en su producción ganadera. A nivel global, la alta prevalencia de sulfonamidas (20) y fluoroquinolonas (14) en recursos hídricos es un hallazgo crítico, dada su persistencia ambiental y su potencial para fomentar resistencias antimicrobianas en ecosistemas acuáticos (Robles-Jimenez et al., 2021). Esta recurrente presencia en aguas superficiales responde a dos vías principales de entrada. Por un lado, los efluentes de aguas residuales vertidas directamente constituyen una fuente puntual relevante; así, Shimizu et al. (2013) registraron concentraciones

medias de sulfametoxazol (SMX) entre 76 y 1,720 ng/L en efluentes ganaderos de cinco países asiáticos (García-Galán et al., 2012). Por otro lado, la escorrentía desde áreas agrícolas y pecuarias actúa como vía difusa crítica, movilizando antibióticos desde campos fertilizados con estiércol hacia cuerpos de agua, especialmente cuando llueve poco después de la aplicación de estas enmiendas (Le et al., 2018).

El predominio de la extracción en fase sólida acoplada a cromatografía de líquidos (SPE-LC) refleja que la determinación de antibióticos en aguas sigue dependiendo de estrategias avanzadas de preconcentración para abordar niveles ultratrazas en matrices complejas (Szymańska et al., 2019). La optimización de métodos de alta sensibilidad mediante SPE-UHPLC-MS/MS se ha consolidado como el estándar para garantizar selectividad y límites de cuantificación robustos (Mooney et al., 2020; Shen et al., 2022). Por otra parte, la coexistencia de metodologías moleculares junto a las químicas (LC-MS) sugiere un cambio de paradigma. La comunidad científica ya no solo cuantifica el residuo, sino que busca caracterizar el impacto biológico mediante el rastreo de genes de resistencia antimicrobiana (ARG) (Okoye et al., 2022). Herramientas como la PCR y la metagenómica superan las limitaciones del cultivo microbiológico, permitiendo analizar microorganismos no cultivables bajo el enfoque de one-health (Franklin et al., 2021; Alfahl et al., 2024). No obstante, esta diversidad metodológica introduce heterogeneidad que dificulta la comparación entre

cuenca, evidenciando la necesidad de estandarización global en los protocolos (Niegowska et al., 2021).

Las instalaciones pecuarias y el almacenamiento de estiércol son los principales focos de emisión, mientras que la escorrentía, los lixiviados y el manejo de deyecciones constituyen las rutas críticas de movilización hacia el agua (Robles-Jiménez et al., 2022). Así, el problema no es exclusivo del volumen de fármacos usado, sino que está ligado a deficiencias en la gestión de residuos, el momento de aplicación de enmiendas y las condiciones hidrológicas locales. La fertilización con estiércol sin tratamiento actúa como un vector dual: introduce residuos persistentes y ejerce presión de selección sobre bacterias resistentes (Menz et al., 2019). Esta transferencia se agrava porque aguas superficiales y subterráneas están interconectadas y expuestas a vertidos difusos y puntuales simultáneos (Thangrongthong et al., 2025). Le et al. (2018) demuestran que el método de aplicación y el tiempo previo a lluvias modifican drásticamente la carga transportada por escorrentía. Cuando llueve pronto, procesos de escorrentía, drenaje y lixiviación aceleran el transporte de fármacos y de *E. coli* resistente (Tuts et al., 2025). A nivel de cuenca, este transporte difuso explica la correlación directa entre alta densidad ganadera y la prevalencia de tetraciclinas y sulfonamidas en ríos (Li et al., 2023), lo que coincide con lo expuesto para el río Yangtze y con modelos de riesgo ecotoxicológico global (Hu et al. 2023; Qadeer et al., 2023), confirmando que la escorrentía agrícola y los efluentes pecuarios deficientemente gestionados son los motores principales de la dispersión de antibióticos en ecosistemas acuáticos.

La resistencia antimicrobiana fue una de las implicaciones ambientales más frecuentemente reportadas en los estudios analizados. Este resultado coincide con Kumar et al. (2012), quienes señalaron que la presencia y persistencia de antibióticos veterinarios en el ambiente favorece la aparición y desarrollo de bacterias resistentes, constituyendo una de las principales amenazas ambientales asociadas a estos compuestos. La presencia de residuos de antibióticos en estos entornos acelera significativamente el desarrollo de la resistencia bacteriana, evidenciando la predominancia mundial de la resistencia a los antimicrobianos en cuerpos de agua dulce, afluentes, aguas residuales y plantas de tratamiento de aguas residuales, por lo que la resistencia de los genes antimicrobianos es ahora una importante amenaza para la salud pública y de los ecosistemas (Lajqi Berisha et al., 2024).

CONCLUSIÓN

La revisión sistemática permitió evidenciar que los residuos de antibióticos veterinarios se encuentran ampliamente distribuidos en diferentes recursos hídricos asociados a la actividad

ganadera, principalmente en aguas superficiales, aguas residuales y, en menor proporción, en aguas subterráneas. Entre las familias de antibióticos más reportadas destacan las sulfonamidas, fluoroquinolonas, tetraciclinas y macrólidos, lo que confirma la persistencia y amplia dispersión de estos compuestos en los ecosistemas acuáticos.

Asimismo, se identificó que las principales fuentes de contaminación corresponden a las instalaciones pecuarias, el almacenamiento y la aplicación de estiércol o purines, mientras que la escorrentía superficial, la lixiviación y el manejo inadecuado de residuos pecuarios constituyen las rutas predominantes de transporte hacia los cuerpos de agua. Estos procesos favorecen la movilización de los antibióticos entre diferentes compartimentos ambientales y explican su presencia tanto en sistemas acuáticos superficiales como subterráneos.

Finalmente, la evidencia recopilada demuestra que la resistencia antimicrobiana representa la principal implicancia ambiental asociada a la presencia de antibióticos veterinarios en los recursos hídricos, seguida por los efectos sobre la fauna acuática y la alteración de las comunidades microbianas. En conjunto, estos resultados resaltan la necesidad de fortalecer las estrategias de gestión de los residuos pecuarios, promover prácticas ganaderas sostenibles y estandarizar los métodos de monitoreo ambiental para reducir la liberación de estos contaminantes y contribuir a la protección de los ecosistemas acuáticos y de la salud pública.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: CHB, IMCM; Metodología: JERG; Validación: IMCM; Análisis formal: JERG, CHB, IMCM, LIRM; Investigación: JERG, CHB, IMCM, LIRM; Curación de datos: JERG; Supervisión: JERG, IMCM; Visualización: JERG, CHB; Redacción borrador original: JERG, CHB, IMCM, LIRM; Redacción revisión y edición: JERG, IMCM; Revisión final del manuscrito: IMCM

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros ni relaciones personales que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albarano, L., Suarez, E. G. P., Maggio, C., La Marca, A., Iovine, R., Lofrano, G., Guida, M., Vaiano, V., Carotenuto, M., & Libralato, G. (2024). Assessment of ecological risks posed by veterinary antibiotics in European aquatic environments: A comprehensive review

- and analysis. *Science of the Total Environment*, 954, 176280. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176280>
- Alfahl, Z., Chueiri, A., Carolan, S., Darcy, G., Hussain, N., Cahill, N., & O'Connor, L. (2024). Antimicrobial resistance detection methods in water environments: A scoping review. *Deleted Journal*. <https://doi.org/10.1093/sumbio/qvae034>
- Franklin, A. M., Brinkman, N. E., Jahne, M. A., & Keely, S. P. (2021). Twenty-first century molecular methods for analyzing antimicrobial resistance in surface waters to support One Health assessments. *Journal of Microbiological Methods*, 184, 106174. <https://doi.org/10.1016/j.mimet.2021.106174>
- Felis, E., Kalka, J., Sochacki, A., Kowalska, K., Bajkacz, S., Harnisz, M., & Korzeniewska, E. (2020). Antimicrobial pharmaceuticals in the aquatic environment - occurrence and environmental implications. *European Journal of Pharmacology*, 866, 172813. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2019.172813>
- Gangar, T., & Patra, S. (2023). Antibiotic persistence and its impact on the environment. *3 Biotech*, 13(12). <https://doi.org/10.1007/s13205-023-03806-6>
- García-Galán, M. J., Díaz-Cruz, M. S., & Barceló, D. (2012). Occurrence and Fate of Sulfonamide Antibiotics in Surface Waters: Climatic Effects on Their Presence in the Mediterranean Region and Aquatic Ecosystem Vulnerability. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 167–192. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2111-1_140
- Hu, J., Li, S., Zhang, W., Helbling, D. E., Xu, N., Sun, W., & Ni, J. (2023). Animal production predominantly contributes to antibiotic profiles in the Yangtze River. *Water Research*, 242, 120214. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120214>
- Kumar, R. R., Lee, J. T., & Cho, J. Y. (2012). Fate, occurrence, and toxicity of veterinary antibiotics in environment. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 55(6), 701–709. <https://doi.org/10.1007/s13765-012-2220-4>
- Lajqi Berisha, N., Poceva Panovska, A., & Hajrulai-Musliu, Z. (2024). Antibiotic Resistance and Aquatic Systems: Importance in Public Health. *Water*, 16(17), 2362. <https://doi.org/10.3390/w16172362>
- Le, H. T. V., Maguire, R. O., & Xia, K. (2018). Method of dairy manure application and time before rainfall affect antibiotics in surface runoff. *Journal of Environmental Quality*, 47(5), 1100–1108. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.02.0086>
- Li, S., Hofstra, N., van de Schans, M. G. M., Yang, J., Li, Y., Zhang, Q., Ma, L., Stokol, M., Kroeze, C., Chen, X., Chen, X., & Zhang, F. (2023). Riverine Antibiotics from Animal Production and Wastewater. *Environmental Science & Technology Letters*, 10(11), 1059–1067. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00536>
- Menz, J., Olsson, O., & Kümmerer, K. (2019). Antibiotic residues in livestock manure: Does the EU risk assessment sufficiently protect against microbial toxicity and selection of resistant bacteria in the environment? *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120807. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120807>
- Mooney, D., Coxon, C., Richards, K. G., Gill, L. W., Mellander, P.-E., & Danaher, M. (2020). A new sensitive method for the simultaneous chromatographic separation and tandem mass spectrometry detection of anticoccidials, including highly polar compounds, in environmental waters. *Journal of Chromatography A*, 1618, 460857. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2020.460857>
- Niegowska, M., Sanseverino, I., Navarro, A., & Lettieri, T. (2021). Knowledge gaps in the assessment of antimicrobial resistance in surface waters. *FEMS Microbiology Ecology*, 97(11), fiab140. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiab140>
- Okoye, C. O., Nyaruaba, R., Ita, R. E., Okon, S. U., Addey, C. I., Ebido, C. C., Opabunmi, A. O., Okeke, E. S., & Chukwudozie, K. I. (2022). Antibiotic resistance in the aquatic environment: Analytical techniques and interactive impact of emerging contaminants. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 96, 103995. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103995>
- Qadeer, A., Rui, G., Yaqing, L., Ran, D., Liu, C., Jing, D., Anis, M., Liu, M., Wang, S., Jiang, X., & Zhao, X. (2023). A mega study of antibiotics contamination in Eastern aquatic ecosystems of China: Occurrence, interphase transfer processes, ecotoxicological risks, and source modeling. *Journal of Hazardous Materials*, 458, 131980. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.131980>
- Robles-Jiménez, L. E., Aranda-Aguirre, E., Castelan-Ortega, O. A., Shettino-Bermudez, B. S., Ortiz-Salinas, R., Miranda, M., Li, X., Angeles-Hernandez, J. C., Vargas-Bello-Pérez, E., & Gonzalez-Ronquillo, M. (2022). Worldwide traceability of antibiotic residues from livestock in wastewater and soil: A systematic review. *Animals*, 12(1), 60. <https://doi.org/10.3390/ani12010060>
- Rosato, R., Castellani, F., Ricci, M., Manucci, A., Di Simone, V., Scortichini, G., & Saluti, G. (2025). Antibiotics in the aquatic environment: A deep voyage across chemical occurrence data, socio-economic relationships and international policies on antimicrobial consumption and resistance within 2014–2024. *Science of the Total Environment*, 1002, 180543. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180543>

- Shen, F., Xu, Y.-J., Wang, Y., Chen, J., & Wang, S. (2022). Rapid and ultra-trace levels analysis of 33 antibiotics in water by on-line solid-phase extraction with ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography A*, 1677, 463304. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2022.463304>
- Shimizu, A., Takada, H., Koike, T., Takeshita, A., Saha, M., Rinawati, Nakada, N., Murata, A., Suzuki, T., Suzuki, S., Chiem, N. H., Tuyen, B. C., Viet, P. H., Siringan, M. A., Kwan, C., Zakaria, M. P., & Reungsang, A. (2013). Ubiquitous occurrence of sulfonamides in tropical Asian waters. *Science of The Total Environment*, 452–453, 108–115. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.027>
- Szymańska, U., Wiergowski, M., Sołtyszewski, I., Kuzemko, J., Wiergowska, G., & Woźniak, M. K. (2019). Presence of antibiotics in the aquatic environment in Europe and their analytical monitoring: Recent trends and perspectives. *Microchemical Journal*, 147, 729–740. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.04.003>
- Tuts, L., Heyndrickx, M., Becue, I., Boon, N., De Maesschalck, P., & Rasschaert, G. (2025). Tracking antibiotics and antibiotic-resistant *E. coli* in the aquatic environment linked to agriculture. *Environmental Pollution*, 374, 126265. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126265>
- Zainab, S. M., Junaid, M., Xu, N., & Malik, R. N. (2020). Antibiotics and antibiotic resistant genes (ARGs) in groundwater: A global review on dissemination, sources, interactions, environmental and human health risks. *Water Research*, 187, 116455. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116455>