

Eutrofización cultural: evolución del conocimiento científico global y brechas regionales en Latinoamérica

Cultural eutrophication: evolution of global scientific knowledge and regional gaps in Latin America

Eutrofização cultural: evolução do conhecimento científico global e lacunas regionais na América Latina

Ana I. Casarrubias-Jaimes^{1*} ID. 0000-0002-9167-8225

Ana Laura Juárez-López² ID. 0000-0003-1020-7198

1* Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, Puerto Vallarta, Jalisco, México. CP. 48280.

2. Universidad Autónoma de Guerrero, Centro de Ciencias de Desarrollo Regional, Acapulco, Guerrero, México. C.P. 39640. aljuarez@uagro.mx

*Autor de correspondencia: aitzelcasarrubias@gmail.com

Enviado: 13/02/2026

Revisado: 29/06/2026

Aprobado: 28/07/2026

Publicado:30/07/2026

Resumen

La eutrofización cultural (EC) constituye una de las principales presiones antropogénicas sobre los ecosistemas acuáticos a nivel global, asociada principalmente con el enriquecimiento excesivo de nutrientes derivado de la agricultura intensiva, las descargas de aguas residuales y las actividades industriales. A pesar de su relevancia ecológica y socioambiental, el conocimiento científico sobre su distribución, terminología, causas y ecosistemas afectados presenta una marcada heterogeneidad, particularmente en regiones como Latinoamérica. Este estudio realizó un mapeo

sistemático de la literatura para caracterizar la evolución del conocimiento científico sobre la EC entre 2000 y 2023, mediante el análisis de tendencias temporales, distribución geográfica, tipos de ecosistemas estudiados y causas antropogénicas reportadas. Se revisaron 321 artículos indexados en Scopus mediante el software Publish or Perish. Los resultados evidencian un incremento sostenido de publicaciones, con mayor concentración entre 2018 y 2021. Se identificaron cuatro conceptos principales: eutrofización, eutrofización costera, eutrofización antropogénica y eutrofización cultural, siendo este el término predominante. La producción científica se concentró principalmente en Norteamérica y Europa, mientras que África y Latinoamérica permanecieron subrepresentadas. Los lagos fueron los ecosistemas más estudiados, seguidos por estuarios y ríos, reflejando un predominio de investigaciones en ambientes continentales. Las principales causas antropogénicas identificadas fueron la agricultura, las descargas de aguas residuales y las actividades industriales. En Latinoamérica se registraron 33 estudios, principalmente de México y Guatemala, centrados en lagos. Este estudio identifica vacíos geográficos y ecosistémicos relevantes, resaltando la necesidad de fortalecer la investigación en regiones y sistemas ecológicos subrepresentados.

Palabras clave: actividades antropogénicas, ecosistemas acuáticos, eutrofización cultural, Latinoamérica, tendencia

Abstract

Cultural eutrophication (CE) is one of the main anthropogenic pressures on aquatic ecosystems globally, primarily associated with excessive nutrient enrichment from intensive agriculture, wastewater discharges, and industrial activities. Despite its ecological and socio-environmental relevance, scientific knowledge regarding its distribution, terminology, causes, and affected ecosystems exhibits marked heterogeneity, particularly in regions like Latin America. This study systematically mapped the literature to characterize the evolution of scientific knowledge on CE between 2000 and 2023 by analyzing temporal trends, geographic distribution, types of ecosystems studied, and reported anthropogenic causes. A total of 321 articles indexed in Scopus were reviewed using the Publish or Perish software. The results show a sustained increase in publications, with the highest concentration between 2018 and 2021. Four main concepts were identified: eutrophication, coastal eutrophication, anthropogenic eutrophication, and cultural eutrophication, with the latter being the predominant term. Scientific production was concentrated

mainly in North America and Europe, while Africa and Latin America remained underrepresented. Lakes were the most studied ecosystems, followed by estuaries and rivers, reflecting a predominance of research in continental environments. The main anthropogenic causes identified were agriculture, wastewater discharges, and industrial activities. In Latin America, 33 studies were recorded, mainly from Mexico and Guatemala, focusing on lakes. This study identifies significant geographic and ecosystemic gaps, highlighting the need to strengthen research in underrepresented regions and ecological systems.

Keywords: anthropogenic activities, aquatic ecosystems, cultural eutrophication, Latin America, temporal trend

Resumo

A eutrofização cultural (EC) é uma das principais pressões antropogênicas sobre os ecossistemas aquáticos em nível global, associada principalmente ao enriquecimento excessivo de nutrientes provenientes da agricultura intensiva, do lançamento de efluentes e de atividades industriais. Apesar de sua relevância ecológica e socioambiental, o conhecimento científico sobre sua distribuição, terminologia, causas e ecossistemas afetados é marcadamente heterogêneo, particularmente em regiões como a América Latina. Este estudo mapeou sistematicamente a literatura para caracterizar a evolução do conhecimento científico sobre EC entre 2000 e 2023, analisando tendências temporais, distribuição geográfica, tipos de ecossistemas estudados e causas antropogênicas relatadas. Um total de 321 artigos indexados no Scopus foram revisados utilizando o software Publish or Perish. Os resultados mostram um aumento contínuo nas publicações, com a maior concentração entre 2018 e 2021. Quatro conceitos principais foram identificados: eutrofização, eutrofização costeira, eutrofização antropogênica e eutrofização cultural, sendo este último o termo predominante. A produção científica concentrou-se principalmente na América do Norte e na Europa, enquanto a África e a América Latina permaneceram sub-representadas. Os lagos foram os ecossistemas mais estudados, seguidos por estuários e rios, refletindo uma predominância de pesquisas em ambientes continentais. As principais causas antropogênicas identificadas foram a agricultura, o lançamento de efluentes e as atividades industriais. Na América Latina, foram registrados 33 estudos, principalmente do México e da Guatemala, com foco em lagos. Este estudo identifica lacunas geográficas e ecossistêmicas relevantes, destacando a necessidade de fortalecer a pesquisa em regiões e sistemas ecológicos sub-representados.

Palavras-chave: atividades antropogênicas, ecossistemas aquáticos, eutrofização cultural, América Latina, tendência

Introducción

La eutrofización cultural (EC), derivada del aporte excesivo de nutrientes como nitrógeno y fósforo provenientes de la agricultura intensiva, las descargas de aguas residuales y las actividades industriales, se ha consolidado como una de las principales amenazas para la integridad de los ecosistemas acuáticos a nivel global (Malone & Newton, 2020). Se estima que aproximadamente el 36 % del nitrógeno exportado por ríos proviene de suelos transformados por actividades humanas, reflejando una alteración significativa en los balances de nutrientes (Yang et al., 2025). He et al. (2023) estiman que los aportes de nitrógeno y fósforo se han incrementado entre un 40 y un 50 % desde 1980 hasta 2015, favoreciendo desequilibrios tróficos asociados con la proliferación de floraciones algales nocivas, la formación de zonas hipóxicas y la pérdida de biodiversidad. Estas alteraciones generan impactos directos sobre la calidad del agua, la salud pública, la pesca y el turismo.

Este desequilibrio trófico se refleja en el aumento sistemático de las floraciones algales nocivas, que entre 2000 y 2010 crecieron un 44 % a nivel global, especialmente en Asia y África, impulsadas por la intensificación agrícola, la urbanización y los vertidos no tratados (Feng et al., 2024; Malone & Newton, 2020). Asimismo, entre 2003 y 2020 se observó un incremento del 13.2 % en la extensión y del 59.2 % en la frecuencia de floraciones costeras, asociado al calentamiento superficial oceánico (Dai et al., 2023). Este calentamiento potencia la toxicidad de las floraciones, favoreciendo la proliferación de cianobacterias y la liberación de cianotoxinas, con consecuencias graves para peces, fauna doméstica y salud humana (Igwaran et al., 2024). La creciente magnitud e impacto socioeconómico de estas floraciones ha evidenciado la necesidad urgente de enfoques integradores para su monitoreo y gestión.

A pesar del crecimiento del conocimiento científico sobre la EC, persisten vacíos críticos que limitan la respuesta global. Se ha identificado un sesgo geográfico que favorece a Europa y América del Norte, mientras que regiones como África subsahariana, el sudeste asiático y Latinoamérica permanecen subrepresentadas (Dai et al., 2023; Vigouroux & Destouni, 2022; Zarei & Destouni, 2025). A nivel ecosistémico, la mayor parte de los estudios se concentra en lagos y embalses, dejando de lado estuarios y humedales costeros, pese a su alta vulnerabilidad (Savadova-Ratkus et al., 2025). Además, predominan enfoques centrados en variables físico-químicas, con una limitada integración de dimensiones sociales, económicas y de gobernanza. Por ejemplo, solo

el 20 % de los estudios en el Mar Báltico incorporan análisis de presión e impacto (Vigouroux & Destouni, 2022). Esta fragmentación dificulta abordar la EC como un problema sistémico y multiescalar, capaz de afectar múltiples sectores.

En este contexto, este manuscrito tiene como objetivo caracterizar la evolución del conocimiento científico sobre la EC entre 2000 y 2023, a partir del análisis de su tendencia temporal, distribución geográfica, enfoques ecosistémicos y causas antropogénicas predominantes, con el propósito de identificar vacíos de investigación y oportunidades para fortalecer su comprensión y mitigación. Asimismo, se incluye un análisis detallado del contexto latinoamericano, dada su alta vulnerabilidad socioambiental y la limitada representación científica en la región. Al mapear estas dimensiones, esta revisión busca contribuir a una comprensión más estructurada del desarrollo científico del campo, permitiendo reconocer las áreas de concentración temática, las regiones y ecosistemas subrepresentados y las brechas en la integración de dimensiones sociales, ecológicas y políticas. El aporte de este trabajo radica en ofrecer una base de evidencia organizada que permita orientar futuras investigaciones y facilitar el diseño de estrategias más eficaces de monitoreo, prevención y gobernanza ambiental frente a los impactos crecientes de la EC en la calidad del agua, la biodiversidad y el bienestar humano.

Metodología

Este estudio se basó en la recopilación y análisis de publicaciones científicas indexadas en el Journal Citation Reports (JCR), comprendidas entre los años 2000 y 2023. La metodología empleada siguió el enfoque propuesto por Herrera-Navarrete et al. (2021), el cual se estructura en tres etapas: búsqueda, discriminación y categorización.

Software y fuente de datos

La recuperación de documentos se realizó mediante el software Publish or Perish v.7.33 (Harzing, 2007), utilizando como motor de búsqueda la base de datos Scopus, reconocida por su cobertura multidisciplinaria y su uso extendido en estudios bibliométricos (Rose & Kitchin, 2019). Se seleccionó Scopus en lugar de Web of Science porque ofrece una cobertura más amplia en ciencias ambientales, un mayor número de revistas indexadas relevantes para estudios de

eutrofización y un alcance geográfico más diverso, lo que garantiza una recopilación más representativa del conocimiento disponible.

Etapas 1: búsqueda

El objetivo de esta etapa fue conformar un banco de datos acorde con los criterios establecidos para el estudio. La búsqueda se llevó a cabo empleando combinaciones de palabras clave relacionadas con la EC y se incluyeron documentos en inglés y español. La inclusión de estos idiomas respondió a que representan más del 90 % de la producción científica global en ciencias ambientales, además de asegurar una interpretación precisa y homogénea del contenido analizado; otros idiomas fueron excluidos para evitar errores de interpretación y por su escasa presencia en la literatura sobre EC.

Los registros considerados fueron aquellos recuperados a partir de las estrategias de búsqueda descritas en la Tabla 1.

Tabla 1.		
<i>Criterios para la búsqueda y recopilación de documentos</i>		
<i>Campo</i>	<i>Criterio</i>	<i>Especificaciones</i>
Palabras en el título	Cultural Eutrophication	Objeto de estudio, búsqueda conceptual específica.
Palabras clave	Cultural Eutrophication	
Año	2000 - 2022	La búsqueda se realizó en cinco sesiones debido a las limitaciones del software. Session 1: 2000 - 2005; Session 2: 2006 –2010; Session 3: 2011 - 2015; Session 4:2016 – 2020; Session 5: 2021-2023.
Fuente: propia		

El periodo 2000–2023 se definió porque corresponde al intervalo en el que el concepto de EC comenzó a consolidarse en la literatura científica contemporánea, permitiendo capturar su evolución reciente y las tendencias actuales de investigación. Asimismo, las palabras clave se limitaron al término “Cultural Eutrophication” para delimitar correctamente el objeto de estudio y evitar la inclusión de investigaciones centradas en la eutrofización natural o general, cuya dinámica difiere conceptualmente y no responde a causas antropogénicas.

Etapas 2: discriminación

En total se recuperaron 637 documentos, entre los cuales se identificaron artículos científicos, capítulos de libro, actas de congreso, editoriales, cartas, notas, documentos retractados y revisiones. De ellos, se seleccionaron únicamente los artículos científicos ($n = 511$).

Posteriormente, se eliminaron 42 por duplicidad, 140 por abordar temáticas ajenas a la EC, uno por estar publicado en chino y siete por falta de acceso al texto completo. Como resultado, la muestra final quedó conformada por 321 artículos científicos.

El objetivo de esta etapa fue depurar el corpus documental y asegurar la pertinencia temática para el análisis.

Etapa 3: categorización

A partir de los artículos seleccionados, se extrajeron variables como: tipo de evaluación, año de publicación, autoría, revista, título, zona de estudio, país, región geográfica —según la clasificación económica de la Organización de las Naciones Unidas (Salim et al., 2018)—, tipo de ecosistema estudiado y causas antropogénicas asociadas a la EC. Estas variables fueron seleccionadas porque permiten describir con precisión patrones temporales, geográficos y temáticos en la producción científica, lo cual es consistente con los objetivos de un mapeo sistemático de la literatura.

El propósito de esta etapa fue estructurar la información de forma sistemática para facilitar el análisis de patrones espaciales, temáticos y ecosistémicos en la producción científica sobre EC. La base de datos final fue exportada en formato .CSV y procesada en Microsoft Excel para su sistematización y análisis.

Resultados

Tendencia temporal

Durante el periodo 2000–2023 se identificaron cuatro conceptos recurrentes en la literatura científica sobre eutrofización: eutrofización (E), eutrofización antropogénica (EA), eutrofización costera (ECo) y eutrofización cultural (EC). La Figura 1

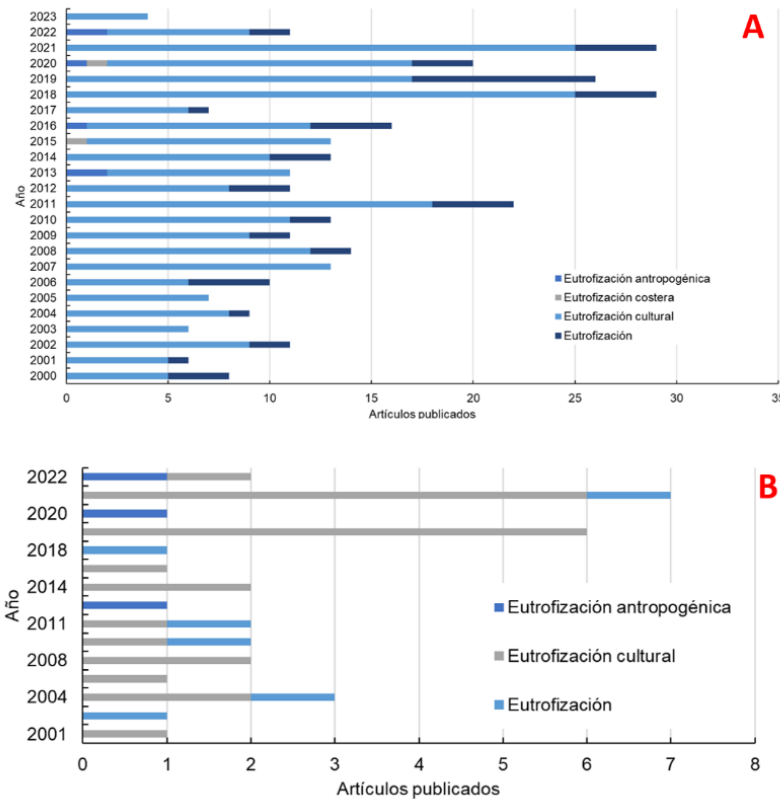


Figura 1. Evolución temporal de las publicaciones científicas sobre eutrofización cultural entre 2000 y 2023 a nivel global (A) y en Latinoamérica (B). Fuente: elaboración propia

muestra la distribución anual de estos conceptos a escala global. El término más empleado fue EC, con una presencia sostenida y creciente a lo largo del tiempo, especialmente entre 2018 y 2021. Este concepto estuvo presente en estudios de todas las regiones geográficas, salvo Oceanía. En contraste, el término ECo fue el menos representado, con apariciones esporádicas en Asia y Norteamérica. Los conceptos E y EA mostraron una distribución dispersa y sin tendencia clara de crecimiento.

La Figura 1(B) presenta la tendencia temporal específica para Latinoamérica. Se identificaron 33 estudios sobre EC, distribuidos principalmente entre 2014 y 2021. El concepto más utilizado fue EC, seguido por E, mientras que EA solo apareció en estudios de Brasil, México y Bolivia. No se identificaron publicaciones que emplearan el término ECo en la región.

A escala global, las principales revistas que difundieron estudios sobre eutrofización fueron aquellas especializadas en cuerpos de agua dulce, sistemas costeros y ciencias ambientales. Journal

of Paleolimnology (18 artículos) y Science of the Total Environment (17 artículos) concentraron la mayor cantidad de estudios sobre EC. Science of the Total Environment fue la única revista que presentó publicaciones en las cuatro categorías conceptuales identificadas. Otras revistas relevantes incluyeron Journal of Great Lakes Research, Hydrobiologia y Aquatic Ecosystem Health and Management, con entre 7 y 10 publicaciones. Ver Tabla 2.

Tabla 2.	
<i>Revistas científicas con mayor número de publicaciones de eutrofización cultural de 2000-2023</i>	
Revista	No. De artículos publicados
Journal of Paleolimnology	18
Science of the Total Environment	17
Limnology and Oceanography	16
Lake and Reservoir Management	15
Hydrobiologia	14
Journal of Great Lakes Research	12
Estuarine, Coastal and Shelf Science	9
Aquatic Ecosystem Health and Management	7
Freshwater Biology	7
Water (Switzerland)	6
Harmful Algae	6
Fuente: elaboración propia	

Distribución geográfica

En Latinoamérica se identificaron 33 estudios durante el periodo evaluado. Los países con mayor producción fueron Guatemala (9), Brasil (7) y México (5), seguidos por Argentina (2), Uruguay (2), Paraguay (2) y Chile (1). La tendencia temporal indica un aumento reciente en la producción científica, aunque con vacíos notables durante los primeros años. Ver figura 2.

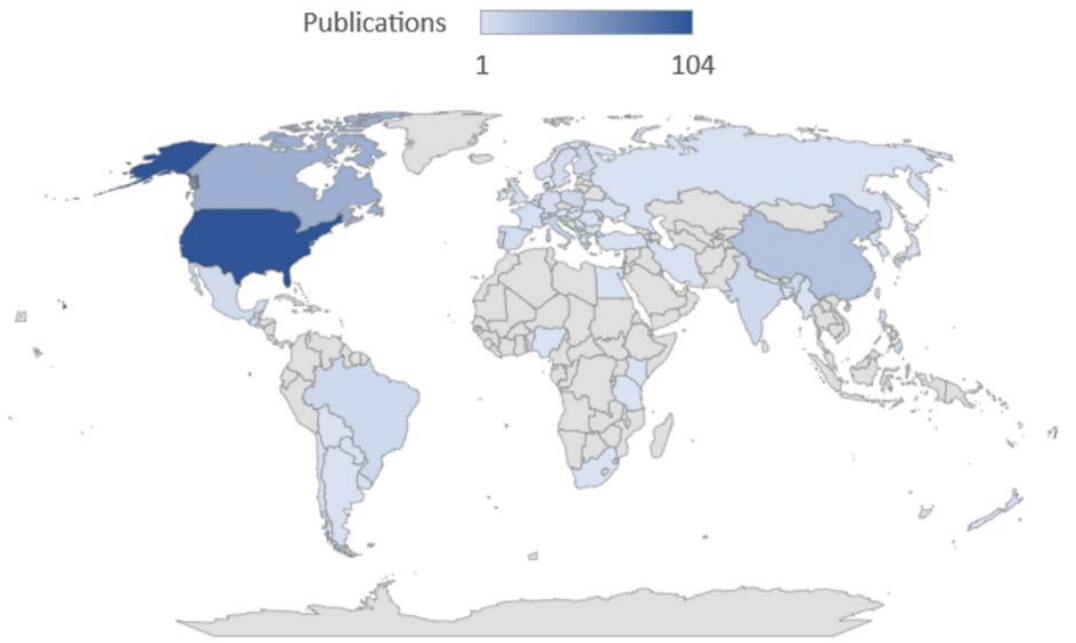


Figura 2. Distribución geográfica global de las publicaciones científicas sobre eutrofización cultural entre 2000 y 2023. Fuente: Elaboración propia

Ecosistemas estudiados

Los lagos fueron el ecosistema más analizado en todas las regiones. En Norteamérica y Europa también se registraron estudios en estuarios y ríos. En Asia, además del predominio de los lagos, se observó una mayor representación de investigaciones en ríos y bahías, respecto a otras regiones. África, Oceanía y América del Sur mostraron una cobertura muy limitada, centrada primordialmente en lagos.

Los estudios latinoamericanos siguieron el patrón global, con predominio de investigaciones en lagos, seguidos por ríos, lagunas costeras y estuarios. En Sudamérica, Brasil destacó por estudios en lagunas costeras (3) y estuarios (1). En Centroamérica, Guatemala concentró sus publicaciones exclusivamente en lagos. México presentó una distribución más diversa, con investigaciones en lagunas costeras (1), lagos (2) y embalses (2). Ver figura 3.

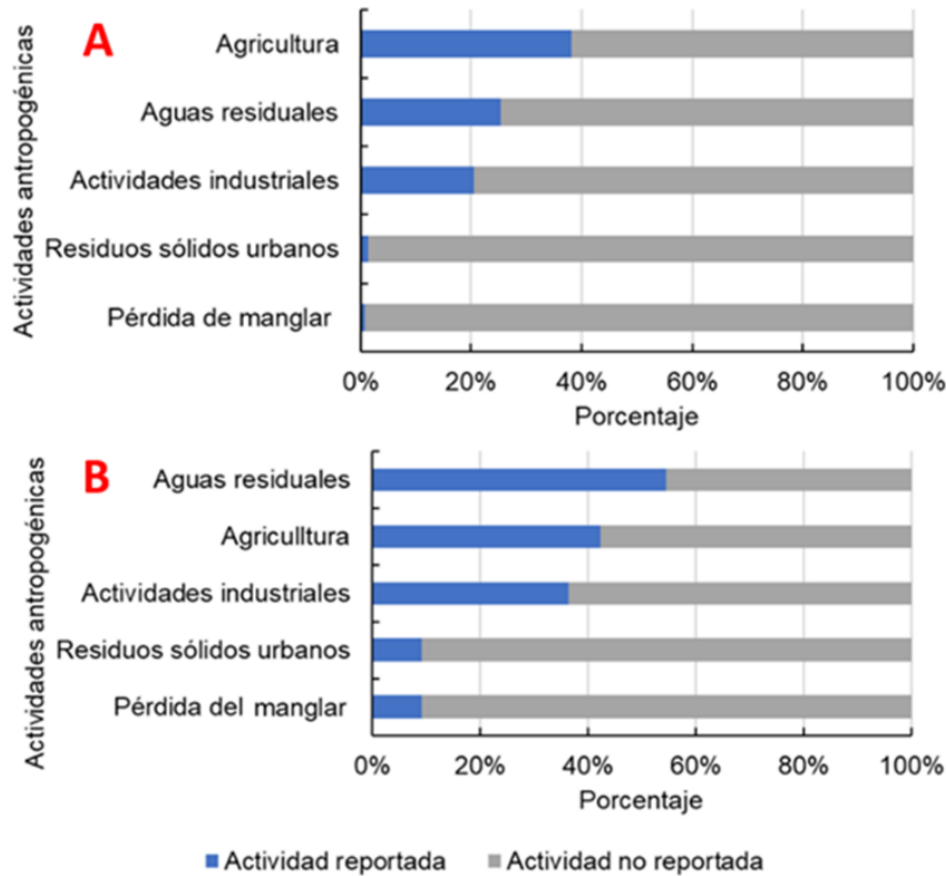


Figura 3. Actividades antropogénicas asociadas con la eutrofización a nivel global (A) y en Latinoamérica (B). Fuente: elaboración propia

Actividades antropogénicas

La Figura 3a resume las causas antropogénicas mencionadas a escala global. La agricultura fue la causa más reportada (38.1 %, n = 168), seguida por las descargas de aguas residuales (25.4 %, n = 112) y las actividades industriales (20.6 %, n = 91). Los residuos sólidos (1.4 %, n = 6) y la pérdida de manglar (0.9 %, n = 4) fueron escasamente mencionados.

En Latinoamérica, las causas reportadas siguieron un patrón similar. Las descargas de aguas residuales fueron la causa más frecuente (18 estudios), seguidas por la agricultura (14) y la actividad industrial (12). Causas como los residuos sólidos y la pérdida de manglar fueron escasamente representadas, como se observa en la Figura 3b.

Discusión

El análisis global realizado evidencia un crecimiento sostenido de la producción científica sobre EC durante las últimas dos décadas, especialmente entre 2018 y 2021. Este patrón coincide con la literatura internacional, que señala una creciente atención hacia los efectos combinados del cambio climático y las actividades humanas en los procesos de eutrofización (Paerl et al., 2016; Paerl & Otten, 2016). La consolidación de la EC como concepto de interés refleja la necesidad de comprender sus implicaciones ecológicas, socioeconómicas y sanitarias, así como de fortalecer las capacidades institucionales para su monitoreo y mitigación (Ghaffar et al., 2021; Schindler et al., 2016; Zhang et al., 2021). La amplia adopción del término EC en diversas regiones con excepción de Oceanía es coherente con esta tendencia.

En términos geográficos, la concentración del conocimiento en el norte global, particularmente en Estados Unidos, Canadá y países europeos, coincide con estudios previos que resaltan su capacidad técnica y regulatoria para evaluar y gestionar nutrientes (Vincon-Leite & Casenave, 2019; Wang et al., 2018). No obstante, esta concentración también refleja brechas estructurales en infraestructura de monitoreo, disponibilidad de datos y continuidad institucional en regiones del Sur global, lo cual se evidencia en la escasa representación de África y Oceanía. Herramientas como la Directiva Marco del Agua en Europa han permitido integrar evaluación ecológica y restauración (Lyche-Solheim et al., 2013; Poikane et al., 2018), lo que explica en parte la mayor estabilidad y volumen de producción científica en estas regiones.

En cuanto a los ecosistemas analizados, la predominancia de estudios en lagos se relaciona con su alta sensibilidad a acumulación de nutrientes y facilidad de monitoreo (Zhang et al., 2021). Sin embargo, la persistente subrepresentación de ecosistemas costeros y estuarinos pese a su relevancia para la pesca, el turismo y la seguridad alimentaria constituye una brecha crítica que limita la capacidad de anticipar impactos en sistemas altamente vulnerables. La falta de investigaciones en estos entornos restringe el desarrollo de estrategias de manejo adaptadas a dinámicas costeras complejas y favorece una visión incompleta del fenómeno.

Las causas antropogénicas identificadas en este estudio descargas de aguas residuales, agricultura intensiva, actividad industrial, residuos sólidos y pérdida de manglar coinciden con los factores documentados en la literatura internacional (Ayala-Borda et al., 2021; Smith et al., 2020;

Bonsdorff, 2021). Sin embargo, persiste una tendencia a abordarlas de manera aislada, en concordancia con análisis que enfatizan la falta de integración entre dimensiones ecológicas, sociales e institucionales en las estrategias de manejo (Malone & Newton, 2020). La persistencia de descargas residuales como causa dominante está vinculada con deficiencias estructurales en saneamiento (Herrera-Navarrete et al., 2021; Liu et al., 2021), mientras que la agricultura continúa representando un desafío por el uso intensivo de fertilizantes y la escorrentía asociada (Ayele & Atlabachew, 2021; Haas et al., 2019; Rankinen et al., 2019).

En conjunto, los resultados de este mapeo sistemático evidencian que las brechas temáticas y geográficas identificadas pueden estar asociadas a desigualdades en infraestructura científica, diferencias regulatorias, disponibilidad de financiamiento y debilidad de marcos interdisciplinarios. Estas brechas tienen implicaciones directas para la gestión ambiental, ya que reducen la capacidad de diseñar estrategias adaptadas a contextos locales, limitan el monitoreo temprano y dificultan la implementación de políticas de mitigación orientadas a reducir los impactos de la EC.

Contexto latinoamericano

El análisis específico para Latinoamérica revela una marcada subrepresentación científica, a pesar de la elevada dependencia regional de los ecosistemas acuáticos para la alimentación, las actividades económicas y diversos servicios ecosistémicos. Esta brecha resulta particularmente relevante debido a que los ecosistemas dulceacuícolas de la región enfrentan múltiples presiones derivadas del cambio climático, la agricultura intensiva, la expansión urbana, la minería, la deforestación y las alteraciones hidrológicas, factores que incrementan su vulnerabilidad y comprometen su conservación y manejo sostenible (Torremorell et al., 2021). Asimismo, prácticas agrícolas insostenibles, persistentes desigualdades en el acceso al agua y al saneamiento, y una gobernanza del agua frecuentemente fragmentada y reactiva continúan agravando la presión sobre estos ecosistemas, lo que evidencia la necesidad de fortalecer la investigación científica y el desarrollo de políticas basadas en evidencia para orientar una gestión integral de los recursos hídricos (Espinoza-Villegas et al., 2025). La literatura internacional coincide en que las brechas de investigación en el Sur global están asociadas a restricciones presupuestales, limitada infraestructura técnica y baja continuidad en los programas de monitoreo (Uwakwe & Kamalu, 2013), lo cual es coherente con los vacíos temporales observados en este estudio. El reciente

aumento de publicaciones en Guatemala, México y Brasil parece responder a crisis ambientales puntuales, como floraciones algales severas o episodios de deterioro agudo de la calidad del agua (Sá et al., 2021; Ulloa et al., 2017; Waters et al., 2021), lo que puede evidenciar respuestas reactivas más que estrategias de investigación sostenidas.

La preferencia por lagos como objeto de estudio es una señal de su accesibilidad y alta sensibilidad a la eutrofización (Kowalczywska-Madura et al., 2024). Sin embargo, la limitada atención hacia estuarios y lagunas costeras restringe la comprensión del fenómeno en ecosistemas cruciales para la pesca y la seguridad alimentaria, brecha ya señalada en estudios internacionales. Casos como el embalse San Roque (Mengo et al., 2024) y el Lago de Maracaibo (Ledo et al., 2023) muestran la necesidad de integrar perspectivas históricas y procesos internos para guiar una gestión más eficaz. (Incorporar casos emblemáticos latinoamericanos: Chapala, Atitlán, Titicaca, Maracaibo, San Roque)

Las causas antropogénicas predominantes en la región agricultura, descargas de aguas residuales e industria coinciden con presiones documentadas a escala global (Conci et al., 2022). No obstante, la literatura latinoamericana evidencia una limitada integración entre ciencia ecológica, ciencias sociales y gobernanza, lo que reproduce los patrones de fragmentación señalados internacionalmente. Adicionalmente, la presencia creciente de contaminantes emergentes (Souza et al., 2022) y la escasez de balances hidrológicos robustos (Zarei & Destouni, 2025) subrayan la urgencia de fortalecer la infraestructura de monitoreo y la cooperación científica regional para atender la creciente presión sobre los ecosistemas acuáticos. (Gobernanza ambiental en América Latina; fragmentación institucional, gestión integrada de cuencas, coordinación entre niveles de gobierno; esto fortalecerá la explicación de por qué continúa existiendo la fragmentación entre ciencia, sociedad y gobernanza).

Los resultados de este mapeo sistemático muestran que las brechas científicas en torno al estudio de la EC están asociadas a desigualdades estructurales ampliamente documentadas: concentración del conocimiento en el Norte global, limitada capacidad técnica y financiera en regiones vulnerables y predominio de enfoques fragmentados que abordan las causas de la eutrofización de manera aislada. Estas brechas dificultan la anticipación de riesgos, reducen la eficacia de las intervenciones y obstaculizan la adaptación de los marcos regulatorios a contextos locales.

No obstante, emergen oportunidades relevantes. La literatura resalta el valor de promover estudios interdisciplinarios, fortalecer redes internacionales de colaboración y desarrollar metodologías integradoras capaces de articular dimensiones biofísicas, sociales e institucionales (Giulianetti de Almeida et al., 2023). Asimismo, la vinculación entre ciencia, gobernanza y participación social se perfila como un eje estratégico para avanzar hacia estrategias de manejo contextualizadas y sostenibles. La EC puede funcionar como un punto de convergencia para alinear producción científica, gestión ambiental y desarrollo sostenible, especialmente en regiones donde los impactos socioecológicos son más intensos y la capacidad de respuesta es limitada. (Experiencias latinoamericanas exitosas: restauración de animales, manejo integrado de cuencas, soluciones basadas en la naturaleza, monitoreo participativo, gobernanza colaborativa)

Retos y oportunidades en Latinoamérica

En Latinoamérica, la literatura sugiere que las brechas identificadas responden a limitaciones estructurales en monitoreo, financiamiento e institucionalidad ambiental (Uwakwe & Kamalu, 2013), lo cual coincide con los vacíos temporales y la baja continuidad observados en este estudio. Estas limitaciones se ven agravadas por procesos de urbanización acelerada y por deficiencias persistentes en la infraestructura de saneamiento, particularmente en zonas periurbanas, donde las aguas residuales constituyen una de las principales fuentes de contaminación de los cuerpos de agua. Además, el predominio de enfoques de investigación centrados en aspectos técnicos evidencia la necesidad de fortalecer perspectivas interdisciplinarias que integren dimensiones ecológicas, sociales y de gobernanza para mejorar la gestión sostenible del agua (Guzmán Sánchez et al., 2024). La concentración de investigaciones en lagos, aunque responde a su sensibilidad y accesibilidad, invisibiliza ecosistemas críticos como estuarios y lagunas costeras, fundamentales para la pesca y la seguridad alimentaria.

Otro reto clave es la falta de sistemas de monitoreo integrales y datos hidrológicos robustos, lo que dificulta anticipar escenarios y diseñar estrategias preventivas eficaces. La escasez de mediciones directas y de balances hídricos completos en las cuencas latinoamericanas constituye una de las brechas más críticas. Tanto la literatura regional como internacional coinciden en que esta ausencia de información limita la comprensión de la dinámica de nutrientes y la capacidad de evaluar la efectividad de las intervenciones (Zarei & Destouni, 2025). Esta limitación adquiere

mayor relevancia en un contexto de cambio climático, donde el incremento de la temperatura y la mayor frecuencia de eventos de precipitación intensa modifican las condiciones hidrológicas y la disponibilidad de nutrientes, influyendo en la dinámica del fitoplancton y favoreciendo el desarrollo y persistencia de floraciones algales. Estos procesos refuerzan la necesidad de fortalecer los sistemas de monitoreo para anticipar cambios ecológicos y diseñar estrategias de manejo adaptativas frente al incremento de los riesgos asociados a la eutrofización (Li et al., 2025; Wang et al., 2026).

A pesar de estas limitaciones, la región presenta oportunidades relevantes. Las tecnologías de teledetección, la modelación predictiva y las soluciones basadas en la naturaleza pueden complementar las limitaciones de infraestructura, como señala la literatura sobre restauración ecológica y gestión adaptativa. En este contexto, la restauración ecológica implementada bajo el enfoque de soluciones basadas en la naturaleza constituye una alternativa para fortalecer la resiliencia de los ecosistemas, al contribuir simultáneamente a la adaptación al cambio climático y a la conservación de la biodiversidad (Pereira Lindoso et al., 2025). Asimismo, la literatura reciente destaca que, en América Latina, la efectividad de estas soluciones depende de su adaptación a los biomas locales, los ecosistemas y los contextos socioculturales, promoviendo estrategias impulsadas por las comunidades que fortalezcan su pertinencia e inclusión (Martins et al., 2025). Asimismo, consolidar una gobernanza ambiental participativa y fortalecer alianzas entre la academia, las comunidades locales y los tomadores de decisiones puede favorecer estrategias más inclusivas y contextualizadas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Limitaciones

Este estudio presenta algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados. En primer lugar, la selección de publicaciones se basó exclusivamente en documentos indexados en Scopus, lo que pudo excluir investigaciones relevantes publicadas en otros repositorios o en revistas regionales no indexadas. Además, la categorización de los conceptos y causas antropogénicas dependió de la información explícitamente reportada en los artículos analizados, lo que puede subestimar la complejidad real de los procesos de eutrofización y omitir variables contextuales clave. Finalmente, la menor disponibilidad de datos en ciertas regiones,

especialmente en Latinoamérica y África, limita la representatividad global y dificulta realizar comparaciones equitativas entre regiones.

Estas limitaciones confirman patrones descritos en la literatura y refuerzan la necesidad de promover estudios complementarios que integren múltiples fuentes de información, metodologías diversas y enfoques interdisciplinarios para fortalecer la comprensión global de la EC.

Conclusiones

Este mapeo sistemático de la literatura examinó la evolución del conocimiento científico sobre la EC entre 2000 y 2023, a partir del análisis de 321 artículos publicados recuperados de Scopus. Los resultados evidenciaron un incremento progresivo en la producción científica durante el periodo analizado, con un mayor volumen de publicaciones entre 2018 y 2021. Asimismo, se observó que el término EC fue el más utilizado en la literatura, mientras que conceptos relacionados, como ECo y EA, tuvieron menor presencia y un uso menos consistente, lo que indica variabilidad terminológica en el campo.

En cuanto a la distribución geográfica, la investigación se concentró principalmente en Norteamérica, Europa y Asia, mientras que África, Oceanía y Latinoamérica estuvieron escasamente representadas. Respecto a los ecosistemas estudiados, los lagos fueron los sistemas más analizados, seguidos de estuarios, ríos y lagunas costeras, lo que muestra una orientación predominante hacia ecosistemas continentales.

Las causas antropogénicas asociadas a la EC más reportadas incluyeron la agricultura, las descargas de aguas residuales, los residuos sólidos, las actividades industriales y la pérdida de manglar. No obstante, la mayoría de los artículos abordó dichas causas desde perspectivas esencialmente biofísicas, con una menor integración de dimensiones sociales, institucionales o económicas.

En el caso de Latinoamérica, se identificó una representación reducida y concentrada en un número limitado de países, con una mayor atención a lagos frente a otros ecosistemas relevantes. Esta distribución evidencia vacíos regionales específicos dentro del corpus analizado.

En conjunto, este mapeo sistemático permitió identificar tendencias temporales, patrones geográficos y preferencias ecosistémicas en el estudio de la EC durante las últimas dos décadas. Los vacíos detectados especialmente en regiones poco estudiadas, ecosistemas costeros y enfoques

interdisciplinarios representan áreas de oportunidad para investigaciones futuras orientadas a ampliar y diversificar el panorama actual del conocimiento sobre la EC

Referencias

- Ayala-Borda, P., Lovejoy, C., Power, M., & Rautio, M. (2021). Evidence of eutrophication in Arctic lakes. *Arctic Science*, 7(4), 859–871. <https://doi.org/10.1139/as-2020-0033>
- Ayele, H. S., & Atlabachew, M. (2021). Review of characterization, factors, impacts, and solutions of lake eutrophication: Lesson for Lake Tanachet, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(12), 14233–14252. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12081-4>
- Bonsdorff, E. (2021). Eutrophication: Early warning signals, ecosystem-level and societal responses, and ways forward. *Ambio*, 50(4), 753–758. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01432-7>
- Conci, E., Becker, A. R., Arena, A. P., & Civit, B. M. (2022). A literature review of eutrophication in Life Cycle Assessment: Relevance for Pampean agroecosystems in Argentina. *South Florida Journal of Development*, 3(1), 618–643. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-046>
- Dai, Y., Yang, S., Zhao, D., Hu, C., Xu, W., Anderson, D. M., ... Feng, L. (2023). Coastal phytoplankton blooms expand and intensify in the 21st century. *Nature*, 615(7951), 280–284. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-05760-y>
- Espinoza-Villegas, J. R., Housni, F. E., Lares-Michel, M., Salazar Estrada, J. G., Righini, N., & Aguilera Cervantes, V. G. (2025). *Water sustainability strategies and policies in Mexico: Comparative insights from Latin America. Nature-Based Solutions*, 8, 100288. <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2025.100288>
- Feng, L., Wang, Y., Hou, X., Qin, B., Kuster, T., Qu, F., ... Zheng, C. (2024). Harmful algal blooms in inland waters. *Nature Reviews Earth & Environment*, 5(9), 631–644. <https://doi.org/10.1038/s43017-024-00578-2>
- Ghaffar, S., Jomaa, S., Meon, G., & Rode, M. (2021). Spatial validation of a semi-distributed hydrological nutrient transport model. *Journal of Hydrology*, 593. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125818>

- Giulianetti de Almeida, M. P., Mockaitis, G., & Weissbrodt, D. G. (2023). Got whey? Sustainability endpoints for the dairy industry through resource biorecovery. *Fermentation*, 9(10). <https://doi.org/10.3390/fermentation9100897>
- Guzmán Sánchez, J., Perevochtchikova, M., & Kolb, M. (2024). *Wastewater in Latin American urban peripheries: Identifying research trends and challenges through a systematic literature review*. *Science of the Total Environment*, 931, 173019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173019>
- Haas, M., Baumann, F., Castella, D., Haghipour, N., Reusch, A., Strasser, M., ... Dubois, N. (2019). Roman-driven cultural eutrophication of Lake Murten, Switzerland. *Earth and Planetary Science Letters*, 505, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.10.027>
- Harzing, A. W. (2007). Publish or Perish. <https://harzing.com/resources/publish-or-perish>
- He, G., Lao, Q., Jin, G., Zhu, Q., & Chen, F. (2023). Increasing eutrophication driven by the increase of phosphate discharge in a subtropical bay in the past 30 years. *Frontiers in Marine Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1184421>
- Herrera-Navarrete, R., Arellano-Wences, H. J., Colín-Cruz, A., Sampedro-Rosas, M. L., Rosas-Acevedo, J. L., & Rodríguez-Herrera, A. L. (2021). Thematic and geographical trend in scientific research applied in municipal wastewater treatment plants: An overview. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(8). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05269-y>
- Igwaran, A., Kayode, A. J., Moloantoa, K. M., Khetsha, Z. P., & Unuofin, J. O. (2024). Cyanobacteria harmful algae blooms: Causes, impacts, and risk management. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(1). <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06782-y>
- Kowalczevska-Madura, K., Dunalska, J. A., Kutyla, S., & Kobus, S. (2024). Bottom sediments as an indicator of the restoration potential of lakes: A case study of a small, shallow lake under significant tourism pressure. *Scientific Reports*, 14(1), 13438. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64058-9>
- Ledo, H., Moreno-Rojas, R., Marín, J., Colina, M., & Torres, J. (2023). Phosphorus release from a tropical estuary sediment: A laboratory study of Lake Maracaibo (Venezuela). *International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology*, 8(4), 145–156. <https://doi.org/10.22161/ijeab.84.15>

- Li, Y., Tang, S., Nie, Z., Zhu, J., Liu, Z., & Yang, J. R. (2025). *Response of phytoplankton communities to hydrological pulses and nutrient changes induced by heavy summer rainfall in a shallow eutrophic lake*. *Plants*, 14(21), 3395.
<https://doi.org/10.3390/plants14213395>
- Lin, S. S., Shen, S. L., Zhou, A., & Lyu, H. M. (2021). Assessment and management of lake eutrophication: A case study in Lake Erhai, China. *Science of the Total Environment*, 751, 141618. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141618>
- Liu, F., Zhang, H., Wang, Y., Yu, J., He, Y., & Wang, D. (2024). *Hysteresis analysis reveals how phytoplankton assemblage shifts with the nutrient dynamics during and between precipitation patterns*. *Water Research*, 251, 121099.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.121099>
- Liu, W., Iordan, C. M., Cherubini, F., Hu, X., & Fu, D. (2021). Environmental impacts assessment of wastewater treatment and sludge disposal systems under two sewage discharge standards: A case study in Kunshan, China. *Journal of Cleaner Production*, 287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125046>
- Lyche-Solheim, A., Feld, C. K., Birk, S., Phillips, G., Carvalho, L., Morabito, G., ... Poikane, S. (2013). Ecological status assessment of European lakes: A comparison of metrics for phytoplankton, macrophytes, benthic invertebrates and fish. *Hydrobiologia*, 704(1), 57–74. <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1436-y>
- Malone, T. C., & Newton, A. (2020). The globalization of cultural eutrophication in the coastal ocean: Causes and consequences. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00670>
- Martins, I. L., Uliana, A. L. S., Matos, E. B., & Rocha, B. M. (2025). *Nature-based solutions and urban flood: A global and Latin American review*. *PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção*, 16, e025014. <https://doi.org/10.20396/parc.v16i00.8676691>
- Mengo, L., Deon, J., Halac, S., Foray, G., Loizeau, J.-L., Ariztegui, D., ... Piovano, E. (2024). Deciphering the intricate link between watershed-level land use changes and reservoir

- eutrophication in central Argentina over the 20th–21st century. *Anthropocene*, 46, 100437. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2024.100437>
- Paerl, H. W., & Otten, T. G. (2016). Duelling "CyanoHABs": Unravelling the environmental drivers controlling dominance and succession among diazotrophic and non-N₂-fixing harmful cyanobacteria. *Environmental Microbiology*, 18(2), 316–324. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13035>
- Paerl, H. W., Gardner, W. S., Havens, K. E., Joyner, A. R., McCarthy, M. J., Newell, S. E., ... Scott, J. T. (2016). Mitigating cyanobacterial harmful algal blooms in aquatic ecosystems impacted by climate change and anthropogenic nutrients. *Harmful Algae*, 54, 213–222. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2015.09.009>
- Pereira Lindoso, D., Boix, D., Ribas, A., Bou, J., & Quintana, X. D. (2025). *Deurbanizing for conservation and adapting: Framing ecological restoration as a nature-based solution in La Pletera salt marsh, Catalonia (Spain)*. *Frontiers in Water*, 6, 1462412. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1462412>
- Poikane, S., Portielje, R., Denys, L., Elferts, D., Kelly, M., Kolada, A., ... van den Berg, M. S. (2018). Macrophyte assessment in European lakes: Diverse approaches but convergent views of “good” ecological status. *Ecological Indicators*, 94, 185–197. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.056>
- Rankinen, K., Cano Bernal, J. E., Holmberg, M., Vuorio, K., & Granlund, K. (2019). Identifying multiple stressors that influence eutrophication in a Finnish agricultural river. *Science of the Total Environment*, 658, 1278–1292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.294>
- Rose, M. E., & Kitchin, J. R. (2019). Pybliometrics: Scriptable bibliometrics using a Python interface to Scopus. *SoftwareX*, 10, 100263. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100263>
- Sá, A. K. D. de S., Cutrim, M. V. J., Costa, D. S., Cavalcanti, L. F., Ferreira, F. S., Oliveira, A. L. L., & Serejo, J. H. F. (2021). Algal blooms and trophic state in a tropical estuary blocked by a dam (northeastern Brazil). *Ocean and Coastal Research*, 69. <https://doi.org/10.1590/2675-2824069.20-006akddss>
- Salim, H. K., Padfield, R., Hansen, S. B., Mohamad, S. E., Yuzir, A., Syayuti, K., ... Papargyropoulou, E. (2018). Global trends in environmental management system and ISO

- 14001 research. Journal of Cleaner Production, 170, 645–653.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.017>
- Savadova-Ratkus, K., Grendaitė, D., Karosienė, J., Stonevičius, E., Kasperovičienė, J., & Koreivienė, J. (2025). Modelling harmful algal blooms in a mono- and a polydominant eutrophic lake under temperature and nutrient changes. Water Research, 275, 123138.
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123138>
- Schindler, D. W., Carpenter, S. R., Chapra, S. C., Hecky, R. E., & Orihel, D. M. (2016). Reducing phosphorus to curb lake eutrophication is a success. Environmental Science & Technology, 50(17), 8923–8929. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b02204>
- Smith, J. S., Winston, R. J., Tirpak, R. A., Wituszynski, D. M., Boening, K. M., & Martin, J. F. (2020). The seasonality of nutrients and sediment in residential stormwater runoff: Implications for nutrient-sensitive waters. Journal of Environmental Management, 276, 111248. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111248>
- Souza, M. C. O., Rocha, B. A., Adeyemi, J. A., Nadal, M., Domingo, J. L., & Barbosa, F., Jr. (2022). Legacy and emerging pollutants in Latin America: A critical review of occurrence and levels in environmental and food samples. Science of the Total Environment, 848, 157774. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157774>
- Torremorell, A., Hegoburu, C., Brandimarte, A. L., Rodrigues, E. H. C., Pompêo, M., da Silva, S. C., ... Navarro, E. (2021). Current and future threats for ecological quality management of South American freshwater ecosystems. Inland Waters, 11(2), 125–140.
<https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1608115>
- Torremorell, A., Hegoburu, C., Brandimarte, A. L., Rodrigues, E. H. C., Pompêo, M., da Silva, S. C., Moschini-Carlos, V., Caputo, L., Fierro, P., Mojica, J. I., Pantoja-Matta, Á. L., Donato, J. C., Jiménez-Pardo, P., Molinero, J., Ríos-Touma, B., Goyenola, G., Iglesias, C., López-Rodríguez, A., Meerhoff, M., ... Navarro, E. (2021). *Current and future threats for ecological quality management of South American freshwater ecosystems. Inland Waters*, 11(2), 125–140. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1608115>
- Ulloa, M. J., Álvarez-Torres, P., Horak-Romo, K. P., & Ortega-Izaguirre, R. (2017). Harmful algal blooms and eutrophication along the Mexican coast of the Gulf of Mexico large marine

- ecosystem. Environmental Development, 22, 120–128.
<https://doi.org/10.1016/j.envdev.2016.10.007>
- Uwakwe, F. E., & Kamalu, N. A. (2013). Effective environmental management: A panacea for socio-economic development of developing countries. Academic Journal of Interdisciplinary Studies, 2(6), 175–180. <https://doi.org/10.5901/ajis.2013.v2n6p175>
- Vigouroux, G., & Destouni, G. (2022). Gap identification in coastal eutrophication research: Scoping review for the Baltic system case. Science of the Total Environment, 839, 156240. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156240>
- Vincon-Leite, B., & Casenave, C. (2019). Modelling eutrophication in lake ecosystems: A review. Science of the Total Environment, 651(2), 2985–3001. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.320>
- Wang, S., Li, J., Zhang, B., Spyarakos, E., Tyler, A. N., Shen, Q., ... Peng, D. (2018). Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel–Ule index. Remote Sensing of Environment, 217, 444–460. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.026>
- Waters, M. N., Brenner, M., Curtis, J. H., Romero-Oliva, C. S., Dix, M., & Cano, M. (2021). Harmful algal blooms and cyanotoxins in Lake Amatitlán, Guatemala, coincided with ancient Maya occupation in the watershed. Proceedings of the National Academy of Sciences, 118(48). <https://doi.org/10.1073/pnas.2109919118>
- Yang, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Yu, C., & Xu, Z. (2025). Impacts of watershed nutrient loads on eutrophication risks under multiple socio-economic development scenarios in the Pearl River Estuary, China. Journal of Cleaner Production, 496, 145133. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145133>
- Zarei, M., & Destouni, G. (2025). Baltic hydro-climatic data: A regional data synthesis for the Baltic Sea drainage basin. Frontiers in Earth Science, 13. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1595943>
- Zhang, Y., Li, M., Dong, J., Yang, H., Van Zwieten, L., Lu, H., ... Wang, H. (2021). A critical review of methods for analyzing freshwater eutrophication. Water, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020225>