



**Somos calidad,
somos USC**

**Evaluación de tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales
industriales en Colombia: Una revisión sistemática**

Autor

David Alberto Osorio Campo

Título por el que opta

Magíster en Química Industrial

Director

Dennis Mauricio Ocampo Chagüendo

Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente (GIEMA)

Línea de Investigación: Solución a problemas ambientales

**Universidad Santiago de Cali
Facultad de Ciencias Básicas
Maestría en Química Industrial
Santiago de Cali - Colombia
2025**

IMPACTOS

IMPACTO	PRODUCTO	BENEFICIARIO(S)
Económico	Comparación de madurez Tecnológica y logística en la aplicación de Tratamientos de aguas residuales novedosas	Industria pública y privada de prestación de servicios públicos de primera necesidad
Responsabilidad social	Apropiación del conocimiento.	Todo el territorio colombiano
Científico	Apropiación del conocimiento	Comunidad científica y empresarial en el sector de ingeniería y ciencias ambientales
Indicadores de Gestión	Industrialización y mejora continua en procesos de tratamiento de aguas residuales	Industria pública y privada de prestación de servicios públicos de primera necesidad
Tecnológico	Profundización de conocimiento en nuevas técnicas de purificación de aguas residuales	Comunidad científica e industrial en el sector de ingeniería y ciencias ambientales
Técnico	Apropiación de nuevas metodologías de descontaminación industrial de aguas	Empleados, técnicos y profesionales en el área de ciencias e ingenierías ambientales
Ambiental	Contribución con el cumplimiento de la normatividad ambiental	Disminución en la contaminación de ríos y caudales de aguas potables
Social	Contribución en la adquisición de conocimiento y mecanismos para implementación de metodologías de tratamiento de aguas residuales más eficientes	Todo el territorio colombiano
Cultural	Obtención de recursos hídricos más limpios con mejora en la calidad de vida de la comunidad	Todo el territorio colombiano

EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS EMERGENTES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES EN COLOMBIA: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

David Alberto Osorio Campo¹ (david.osorio04@usc.edu.co)

¹Grupo de Investigación en Electroquímica y Medio Ambiente, Programa de Maestría en Química Industrial. Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Santiago de Cali. Campus Pampalinda Calle 5 # 62-00. Santiago de Cali. Colombia

RESUMEN

La gestión de aguas residuales industriales en Colombia en la actualidad sigue siendo uno de los desafíos más grandes, esto tanto en términos ambientales como en términos tecnológicos para el sector productivo, aunque la resolución 0631 de 2015 establece parámetros claros para los vertimientos, en la práctica, muchas empresas, en especial las empresas pequeñas y medianas, no logran cumplir con dichos estándares, las tecnologías convencionales, aunque ampliamente utilizadas, resultan insuficientes de cara a los contaminantes como metales pesados, colorantes sintéticos o compuestos orgánicos de difícil degradación, las tecnologías procedentes se muestran como una alternativa real para mejorar la eficiencia del tratamiento. Este trabajo se centró en analizar y comparar las tecnologías emergentes que tienen mayor potencial de aplicación en Colombia para el tratamiento de aguas residuales industriales, teniendo en cuenta su rendimiento técnico, su viabilidad operativa, costos de implementación y su nivel de adecuación a la normativa vigente, la metodología utilizada, se basó en una revisión bibliográfica de estudios publicados entre 2015 y 2024 enfocado en cuatro tecnologías: electrocoagulación, procesos de oxidación avanzada (AOPs), sistemas de membranas y centrifugación. Los hallazgos encontrados, destacan que estas tecnologías ofrecen una serie de ventajas importantes respecto a los métodos tradicionales, tanto en términos de eficiencia en la remoción de contaminantes como en la automatización de procesos y en la reducción de residuos secundarios, la electrocoagulación y la centrifugación muestran un alto grado de madurez (TRL ≥ 8), por otra parte, las membranas y los AOPs, requieren mayores recursos técnicos y financieros, pero permiten obtener efluentes de excelente calidad, el estudio concluye con una serie de propuestas para facilitar su adopción progresiva como esquemas de financiación, capacitación técnica y estrategias según el tipo de industria.

Palabras clave: *Electrocoagulación, normatividad ambiental en Colombia, oxidación avanzada, tecnologías emergentes, tratamiento de aguas residuales.*

PUNTOS DESTACADOS

- **Identificación de tecnologías emergentes con alto potencial en Colombia:** Se analizaron cuatro tecnologías —electrocoagulación, AOPs, sistemas de membranas y centrifugación— como alternativas viables para mejorar el tratamiento de aguas residuales industriales.
- **Determinación de la madurez tecnológica de las soluciones evaluadas:** La electrocoagulación y la centrifugación presentan un nivel de madurez tecnológica elevado (TRL ≥ 8), lo que demuestra su viabilidad inmediata en sectores como curtiembres y agroindustria.
- **Evaluación comparativa del desempeño técnico y económico:** El estudio evidenció que, aunque las tecnologías de membranas y AOPs requieren mayores recursos técnicos y financieros, ofrecen efluentes de alta calidad y eficiencia en la remoción de contaminantes complejos.
- **Limitaciones de las tecnologías convencionales:** Se demostró que los métodos tradicionales no son suficientes frente a contaminantes específicos como metales pesados, colorantes sintéticos y compuestos de difícil degradación.
- **Relevancia normativa como factor de adopción:** Se subrayó la importancia de la Resolución 0631 de 2015 como marco regulatorio que impulsa la necesidad de actualización tecnológica en las empresas colombianas.
- **Propuesta de medidas para facilitar la adopción tecnológica:** El estudio concluye con propuestas como esquemas de financiación, capacitación técnica y estrategias personalizadas por tipo de industria, promoviendo una transición efectiva.
- **Visibilizarían de brechas en las pymes:** Se evidenció que las pequeñas y medianas empresas enfrentan grandes desafíos para cumplir con los estándares normativos debido a limitaciones operativas y económicas.

EVALUATION OF EMERGING TECHNOLOGIES FOR THE TREATMENT OF INDUSTRIAL WASTEWATER IN COLOMBIA: A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT

The management of industrial wastewater in Colombia currently remains one of the greatest challenges, both in environmental and technological terms for the productive sector. Although Resolution 0631 of 2015 establishes clear parameters for discharges, in practice, many companies—especially small and medium-sized enterprises—fail to meet these standards. Conventional technologies, although widely used, are insufficient when facing pollutants such as heavy metals, synthetic dyes, or hard-to-degrade organic compounds. Emerging technologies appear as a real alternative to improve treatment efficiency.

This work focused on analyzing and comparing the emerging technologies with the greatest potential for application in Colombia for the treatment of industrial wastewater, taking into account their technical performance, operational feasibility, implementation costs, and level of compliance with current regulations. The methodology used was based on a literature review of studies published between 2015 and 2024, focusing on four technologies: electrocoagulation, advanced oxidation processes (AOPs), membrane systems, and centrifugation.

The findings highlight that these technologies offer several important advantages over traditional methods, both in terms of contaminant removal efficiency and process automation, as well as in the reduction of secondary waste. Electrocoagulation and centrifugation show a high level of maturity (TRL ≥ 8). On the other hand, membranes and AOPs require greater technical and financial resources but can produce effluents of excellent quality. The study concludes with a series of proposals to facilitate their progressive adoption, such as financing schemes, technical training, and strategies tailored to the type of industry.

Keywords: Electrocoagulation, environmental regulations in Colombia, advanced oxidation, emerging technologies, wastewater treatment.

HIGHLIGHTS

- **Identification of emerging technologies with high potential in Colombia:** Four technologies — electrocoagulation, AOPs, membrane systems, and centrifugation— were analyzed as viable alternatives to improve industrial wastewater treatment.
- **Determination of the technological readiness of the evaluated solutions:** Electrocoagulation and centrifugation show a high technological readiness level (TRL ≥ 8), demonstrating their immediate applicability in sectors such as tanneries and agribusiness.
- **Comparative evaluation of technical and economic performance:** The study found that although membrane and AOP technologies require more technical and financial resources, they provide high-quality effluents and are highly effective in removing complex contaminants.
- **Limitations of conventional technologies:** It was demonstrated that traditional methods are insufficient for specific pollutants such as heavy metals, synthetic dyes, and hard-to-degrade organic compounds.
- **Regulatory relevance as a driver for technology adoption:** The importance of Resolution 0631 of 2015 was highlighted as a regulatory framework that pushes companies in Colombia to update their treatment technologies.
- **Proposal of measures to facilitate technological adoption:** The study concludes with proposals such as financing schemes, technical training, and tailored strategies by industry type to promote an effective transition.
- **Visibility of gaps in small and medium enterprises (SMEs):** The study showed that SMEs face major challenges in meeting regulatory standards due to operational and economic limitations.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contextualización del problema

Según del Departamento Nacional de Planeación (2020): "En Colombia, sectores como el textil, químico, minero, agroindustrial y de alimentos han impulsado el crecimiento económico, pero también han contribuido de manera significativa a la generación de aguas residuales con alta carga contaminante". A diferencia de las aguas domésticas, los vertimientos industriales contienen una variedad de compuestos peligrosos metales pesados, sustancias químicas tóxicas, colorantes sintéticos, grasas, nutrientes en exceso y microorganismos patógenos que representan un riesgo serio para los ecosistemas acuáticos y la salud pública si no se tratan adecuadamente. Pese a contar con regulaciones como el Decreto 1076 y la Resolución 0631 de 2015, la implementación efectiva de estas normas aún enfrenta enormes desafíos. Muchas empresas, especialmente las empresas medianas y pequeñas (PYMEs), carecen de infraestructura o recursos para cumplir con los estándares exigidos, lo que ha llevado al deterioro visible de importantes cuerpos de agua, como los ríos Bogotá, Medellín y Cauca.

1.2. Planteamiento del problema

De acuerdo a Tobón-Orozco & Vasco Correa (2020) En Colombia, existe una brecha considerable entre el marco jurídico que regula los vertimientos industriales y la capacidad técnica e institucional del sector para cumplir con dichas normas, lo que promueve el uso de tecnologías convencionales inadecuadas frente a contaminantes complejos y condiciones variables, "mientras que la adopción de tecnologías emergentes permanece limitada por la falta de estudios comparativos, recursos técnicos y evidencia de aplicabilidad (p. 10). Ante esta situación, se hace necesario identificar qué soluciones tecnológicas emergentes ofrecen mejores resultados, no solo en términos de remoción de contaminantes, sino también en costo, adaptabilidad y cumplimiento normativo.

Ilustración 1. Planta de tratamiento de aguas residuales industriales en Tuluá, Valle del cauca, Colombia



Nota. Tomado de Borja, J. (2016). PTAR (Planta de tratamiento de aguas residuales). En Servicios complementarios. CentroAguas S. A. E. S. P. Recuperado el 23 de julio de 2025 de <https://www.centroaguas.com/index.php/servicios/servicios-complementarios/sistema-de-succion-presion/12-servicios/servicios-complementarios/21-ptar>

1.2.1. Contaminantes difíciles de tratar en aguas residuales industriales en Colombia: Limitaciones de los tratamientos convencionales y necesidad de tecnologías emergentes

La gestión de aguas residuales industriales continúa siendo uno de los mayores desafíos tanto en términos ambientales como tecnológicos. Si bien la Resolución 0631 de 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible establece parámetros claros para el vertimiento de aguas residuales, muchos sectores industriales no logran cumplir con los límites normativos, especialmente cuando se trata de contaminantes de difícil degradación o eliminación mediante métodos convencionales.

Entre los compuestos más frecuentes en las aguas residuales industriales colombianas se encuentran los metales pesados, como el cromo hexavalente (Cr^{6+}), níquel, plomo, cadmio, cobre y zinc, los cuales provienen principalmente de actividades como la galvanoplastia, curtiembres, minería y la industria metalmeccánica. Estos metales son altamente tóxicos, bioacumulativos y persistentes, y en concentraciones elevadas pueden causar graves efectos sobre la salud humana y los ecosistemas acuáticos (Gil-Pavas, 1999). Otro grupo problemático son los colorantes sintéticos, especialmente los colorantes azoicos utilizados en la industria textil. Estos compuestos presentan estructuras moleculares altamente estables, resistentes a la degradación biológica y, en muchos casos, son mutagénicos o cancerígenos. Incluso en concentraciones muy bajas, estos colorantes afectan la transparencia del agua, interfieren con la fotosíntesis en cuerpos de agua y generan un impacto visual significativo (ASCUN, 2022).

Asimismo, los contaminantes orgánicos emergentes como fármacos, hormonas sintéticas, productos de cuidado personal (PPCPs), pesticidas, detergentes, fenoles e hidrocarburos aromáticos están siendo detectados en efluentes industriales y urbanos. Estos compuestos son difíciles de eliminar mediante tratamientos convencionales como lodos activados, coagulación-floculación o sedimentación, ya que su biodegradabilidad es muy limitada o nula. Además, algunos de ellos contribuyen a la generación de resistencia bacteriana o actúan como disruptores endocrinos, representando un riesgo para la salud pública (Orozco-Lab, 2024; ResearchGate, 2023).

Los tratamientos convencionales como la clarificación, sedimentación, filtración, y los procesos biológicos tradicionales (por ejemplo, lodos activados o biodiscos) están diseñados principalmente para remover sólidos suspendidos, materia orgánica biodegradable y nutrientes en concentraciones moderadas. No obstante, fallan frente a los contaminantes mencionados anteriormente por varias razones:

- Los metales pesados requieren condiciones específicas de pH para su precipitación y suelen formar complejos que no se eliminan fácilmente, además de generar lodos tóxicos que deben ser gestionados como residuos peligrosos (Gil-Pavas, 1999).
- Los colorantes sintéticos no se degradan fácilmente debido a su estructura aromática y alta estabilidad química; además, tienden a atravesar procesos físicos como filtración sin ser capturados (ASCUN, 2022).

Los compuestos orgánicos persistentes y emergentes atraviesan los procesos convencionales sin sufrir modificaciones significativas y pueden incluso ser recalcitrantes a la descomposición biológica (Espinosa Armendáriz et al., 2024). Frente a esta problemática, es urgente la implementación de tecnologías no convencionales o emergentes que permitan abordar los retos actuales en materia de tratamiento de aguas residuales. Tecnologías como la electrocoagulación, los procesos de oxidación avanzada (AOPs), los sistemas de membranas, y la biosorción o biorremediación especializada, han mostrado altos niveles de eficiencia en la remoción de contaminantes refractarios. Por ejemplo, la electrocoagulación permite oxidar y precipitar metales y colorantes sin necesidad de agregar grandes cantidades de reactivos químicos (Gil-Pavas, 1999); mientras que los procesos de oxidación avanzada como Fenton, ozono o UV permiten la destrucción completa de compuestos orgánicos persistentes (Espinosa Armendáriz et al., 2024).

Estas tecnologías no solo permiten alcanzar los estándares establecidos por la legislación nacional, sino que también se alinean con objetivos globales de sostenibilidad, al mejorar la calidad del agua tratada, reducir la generación de residuos secundarios y permitir la posible reutilización del recurso hídrico. Teniendo en cuenta lo anterior y ante la creciente complejidad de los contaminantes presentes en las aguas residuales industriales colombianas, los tratamientos convencionales han demostrado ser insuficientes. La adopción progresiva de tecnologías emergentes y diferenciales se presenta como una necesidad inaplazable para proteger los recursos hídricos, la salud pública y los ecosistemas, al tiempo que se da cumplimiento a la normativa ambiental vigente.

1.3. Limitaciones de los métodos Tradicionales actuales

Los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales industriales tales como la sedimentación, la coagulación-floculación y los sistemas de lodos activados presentan limitaciones sustanciales frente a contaminantes de alta persistencia. Su capacidad de remoción resulta insuficiente ante compuestos difíciles de degradar, como los metales pesados (por ejemplo, mercurio (Hg), arsénico (As) y plomo (Pb)) y sustancias sintéticas complejas, entre ellas colorantes textiles y disolventes clorados. Estos contaminantes, por su tamaño molecular, estabilidad química y estructura compleja, “son difíciles de eliminar en plantas de tratamiento convencionales debido a su tamaño, persistencia y naturaleza compleja” (PubMed, 2024; MDPI, 2024).

Asimismo, estos sistemas muestran una alta sensibilidad a cambios en la composición del afluente, al caudal y al pH, lo cual compromete su eficiencia operativa y genera respuestas inestables ante condiciones industriales variables (Smith et al., 2021). Esta inestabilidad se refleja frecuentemente en investigaciones sobre instalaciones de tratamiento en contextos industriales. A ello se añade la producción de lodos residuales con elevada toxicidad y volumen significativo, resultado de procesos como la coagulación o la precipitación, los cuales requieren una gestión especializada para su disposición final y representan un riesgo ambiental añadido (Barakat, 2010).

Por otra parte, se observan deficiencias operativas estructurales: muchas instalaciones aún emplean tecnología obsoleta, presentan una eficiencia energética limitada y carecen de sistemas de automatización, lo que obstaculiza tanto su modernización como el cumplimiento normativo. En conjunto, estos factores evidencian que las tecnologías tradicionales resultan insuficientes para responder a los actuales estándares de calidad, seguridad ambiental y sostenibilidad, reforzando así la urgencia de adoptar soluciones tecnológicas emergentes más resilientes, eficientes y adaptables a entornos industriales dinámicos.

1.4. Tecnologías emergentes

Diversas tecnologías emergentes han surgido como respuesta a la complejidad de los nuevos contaminantes industriales. Entre las más destacadas están:

Tabla 1. Tecnologías emergentes

Tecnología	Aplicación principal	Ventajas
electrocoagulación	Metales, sólidos y colorantes	Alta eficiencia con bajo uso de químicos
Oxidación avanzada (AOPs)	Compuestos orgánicos tóxicos	Degradación efectiva mediante radicales libres
Sistemas de membranas	Partículas, sales, microorganismos	Alta calidad del efluente, apto para reúso
Centrifugación	Sólidos suspendidos, colorantes	Operación rápida y adaptable a diversas industrias

Nota. Tomado de Hong, X., Han, Z., Xing, J., Xiao, N., Ding, Y., Wei, G., Wang, X., & Zhang, H. (2025). Recent advances in membrane and integrated processes for the removal of nanoplastics from water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

Aunque probadas internacionalmente, en Colombia su adopción sigue siendo baja debido a costos de inversión, falta de capacitación y limitada documentación.

A pesar de su validación internacional, la incorporación de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia permanece limitada. Esta baja adopción se explica por una combinación de factores estructurales, económicos y técnicos. En primer lugar, “solo el 25 % de las aguas residuales generadas en Colombia se recolecta y trata antes de su vertimiento” (Hong et al., 2025), lo cual pone en evidencia una cobertura técnica deficiente. Incluso en zonas urbanas, apenas “el 31 % de las aguas residuales recibe un tratamiento adecuado” (BNAmericas, 2024), siendo todavía menor la proporción correspondiente a residuos de origen industrial.

Desde el punto de vista económico, los costos iniciales de implementación son una barrera considerable. Por ejemplo, “el valor de instalación de sistemas de ultrafiltración se sitúa entre USD 500.000 y USD 1.000.000 para plantas industriales de tamaño medio”, sin contemplar los gastos operacionales (SAMCO Tech, 2015). En cuanto a las tecnologías de oxidación avanzada, “su diseño e implementación puede superar los USD 3.000.000 para capacidades de 0,42 ML/h” (Hong et al., 2025). Estos niveles de inversión resultan prohibitivos para muchas pequeñas y medianas empresas (PYMEs), que constituyen una porción significativa del sector industrial colombiano.

Adicionalmente, existen falencias operativas críticas. Según HydrateLife (2013), “de 333 plantas de tratamiento inspeccionadas en 2013, 89 se encontraban fuera de funcionamiento”, lo cual evidencia deficiencias tanto en mantenimiento como en formación del personal operativo. La escasez de profesionales capacitados en tecnologías emergentes, sumada a la limitada disponibilidad de estudios de caso nacionales, dificulta aún más la transferencia de conocimiento y la implementación práctica de estas soluciones.

1.5. Justificación del estudio

En consecuencia, la adopción tecnológica en este campo sigue siendo incipiente, y su consolidación dependerá de la articulación de políticas públicas de incentivo, programas de capacitación especializada y un mayor compromiso estatal en términos de inversión en infraestructura y transferencia tecnológica. Este estudio busca cerrar la brecha de conocimiento que existe entre la aplicabilidad real de estas tecnologías en Colombia, por medio de una revisión comparativa, se pretende ofrecer herramientas de análisis útiles para la industria, el gobierno y el sector académico, fomentando decisiones informadas que contribuyan a:

Ilustración 2. Justificación del estudio - contribución



Nota. Elaboración propia

1.6. Pregunta de investigación

Así surge la pregunta problema ¿Cuáles son las tecnologías emergentes más eficientes y viables para el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia?

1.7. Hipótesis

Las tecnologías emergentes representan una alternativa viable para Colombia, pese a sus costos iniciales, su potencial de adaptación y cumplimiento regulatorio les confiere ventajas significativas en términos de sostenibilidad operativa a mediano y largo plazo.

1.8. Objetivos

➤ General:

Investigar y comparar las tecnologías emergentes que puedan tener aplicabilidad en Colombia, para el tratamiento de aguas residuales industriales, realizando una evaluación de su eficiencia y viabilidad en distintos sectores.

➤ Específicos:

- Identificar las principales tecnologías emergentes utilizadas en el tratamiento de aguas residuales industriales.
- Analizar la eficiencia de estas tecnologías en la remoción de contaminantes.
- Evaluar los costos de implementación y operación de estas tecnologías en comparación con los métodos tradicionales.
- Determinar el nivel de cumplimiento de estas tecnologías con la normativa ambiental vigente en Colombia.
- Proponer estrategias para la adopción de estas tecnologías en el sector industrial colombiano.

2. METODOLOGÍA

Enfoque de la investigación

En esta investigación se adoptará un enfoque cualitativo con elementos cuantitativos, por medio de una revisión bibliográfica, este enfoque es adecuado para identificar, analizar y comparar tecnologías emergentes que están siendo aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales, evaluando su eficiencia, viabilidad técnica, costos de implementación, grado de adopción y cumplimiento con la normativa ambiental vigente en Colombia. La elección de este enfoque responde a la necesidad de integrar información científica, técnica y normativa la cual esta dispersa en algunas fuentes, esto con la finalidad de resumir evidencia que oriente la toma de decisiones en los sectores industrial y ambiental.

Tipo y diseño de estudio

El estudio se clasifica como una investigación aplicada de carácter descriptivo y comparativo, basada en el análisis documental de literatura científica, informes técnicos y normativa vigente, el diseño metodológico combina elementos de la revisión bibliográfica sistemática con el análisis comparativo cualitativo, permitiendo:

- Sintetizar información relevante sobre tecnologías emergentes.
- Identificar criterios de eficiencia, costos y aplicabilidad.
- Evaluar el grado de adecuación normativa en el contexto colombiano.

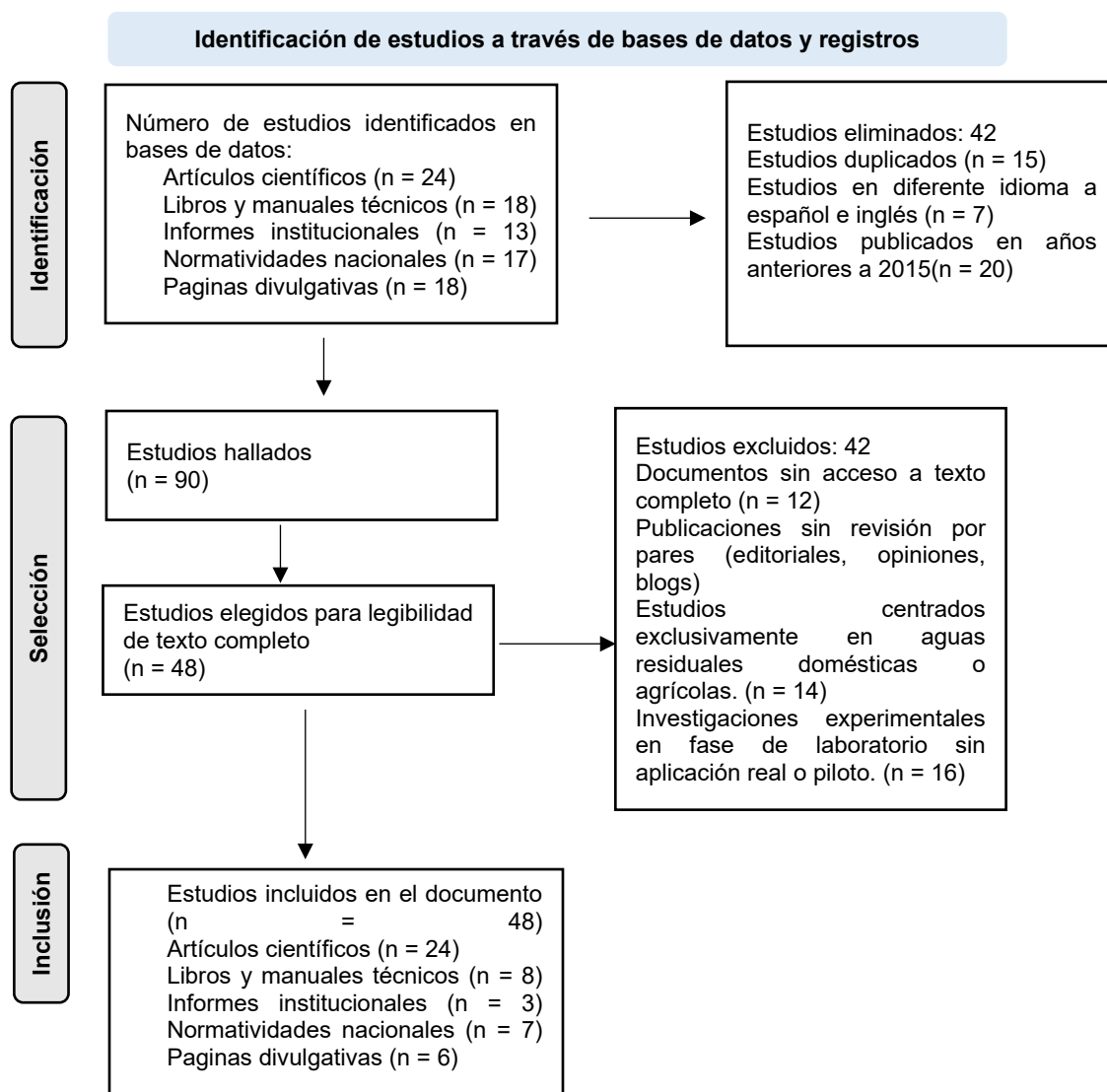
2.1. Búsqueda bibliográfica y criterios de inclusión y exclusión.

Para la búsqueda bibliográfica, se utilizó la ecuación de Scopus: TITLE-ABS-KEY ("technologies for wastewater treatment" OR "treatment technologies for industrial effluents" OR "innovative processes for treating industrial wastewater" OR "tecnologías para el tratamiento de aguas residuales" OR "tecnologías para efluentes industriales" OR "procesos innovadores para tratar aguas residuales industriales")

Esta ecuación combina términos en inglés y en español para ampliar el alcance y recuperar tanto publicaciones internacionales como estudios en lengua hispana. El uso del operador lógico OR permite incluir sinónimos y expresiones equivalentes, lo que garantiza que no se excluyan artículos relevantes por variaciones lingüísticas. Asimismo, la restricción TITLE-ABS-KEY asegura que los términos estén presentes en el título, el resumen o las palabras clave de los documentos, aumentando la probabilidad de que el contenido esté directamente relacionado con tecnologías de tratamiento de aguas residuales e industriales.

Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas y técnicas, incluyendo Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar y SciELO, la búsqueda abarcó artículos científicos, estudios de caso, informes de entes internacionales (como ONU, medio ambiente, OMS), documentos técnicos de agencias ambientales y normativa colombiana, mediante la metodología PRISMA, como se presenta en la siguiente ilustración:

Ilustración 3. Diagrama de flujo de metodología PRISMA aplicada



Nota. Adaptado de Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., *et al.* (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Los criterios incluyeron publicaciones desde el año 2015 hasta 2024, priorizando fuentes recientes y que tuvieran un elevado impacto.

2.1.1. Criterios de inclusión

- Publicaciones académicas en inglés o español.
- Artículos científicos con metodología clara y revisión por pares.
- Estudios sobre tecnologías emergentes aplicadas a aguas residuales industriales.
- Documentos que incluyan información sobre eficiencia, costos, implementación o impacto ambiental.
- Estudios desarrollados en Colombia o en contextos similares de América Latina.

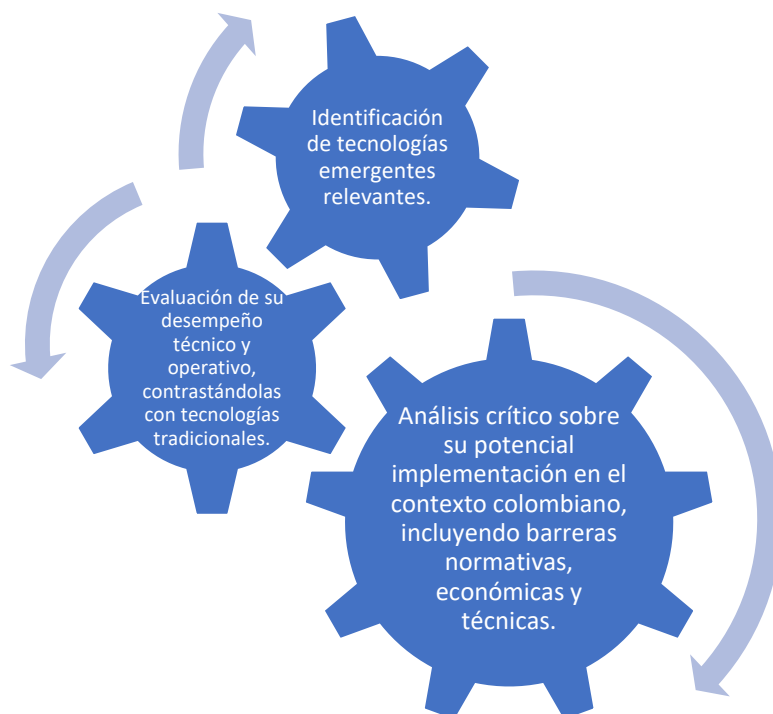
2.1.2. Criterios de exclusión

- Documentos sin acceso a texto completo.
- Publicaciones sin revisión por pares (editoriales, opiniones, blogs).
- Estudios centrados exclusivamente en aguas residuales domésticas o agrícolas.
- Investigaciones experimentales en fase de laboratorio sin aplicación real o piloto.

2.2. Recolección, análisis y síntesis de la información

La información recolectada fue sistematizada en matrices comparativas desarrolladas en Microsoft Excel, permitiendo organizar los datos por tecnología, tipo de contaminante tratado, eficiencia de remoción, costos aproximados, tipo de industria aplicable, escala de implementación y país de referencia.

Ilustración 3. División del análisis



Nota. Elaboración propia

Adicionalmente, se realizó una comparación de las tecnologías en función de su cumplimiento con los parámetros exigidos por la Resolución 0631 de 2015, que establece los límites máximos permisibles de vertimientos a cuerpos de agua y sistemas de alcantarillado público.

2.3. Técnica de análisis e interpretación de resultados

El análisis de resultados se realizará mediante análisis cualitativo comparativo, apoyado en tablas, gráficos y fichas técnicas que facilitarán la interpretación de los datos. La selección de tecnologías se basará en criterios de:

- Eficiencia en remoción de contaminantes.
- Costo-beneficio en operación e implementación.

2.4. Validación y delimitación del estudio

Este estudio se fundamenta en el análisis documental y no contempla la realización de pruebas de laboratorio ni análisis de campo. La validez de la investigación se sustenta en la calidad, actualidad y relevancia de las fuentes consultadas, así como en la coherencia metodológica empleada durante el proceso de análisis.

La delimitación del estudio se establece en los siguientes aspectos:

- *Alcance temático*: Se enfoca exclusivamente en tecnologías emergentes aplicadas al tratamiento de aguas residuales industriales, excluyendo aquellas destinadas a aguas residuales domésticas o agrícolas.
- *Marco temporal*: Se consideran publicaciones y documentos relevantes comprendidos entre los años 2015 y 2024, priorizando aquellos que aporten información actualizada y pertinente al contexto colombiano.
- *Contexto geográfico*: La investigación se centra en el análisis de tecnologías emergentes en el contexto colombiano, considerando también experiencias y estudios en países de América Latina con condiciones industriales y ambientales similares.

Estas delimitaciones permiten enfocar el estudio en aspectos específicos y relevantes, facilitando la obtención de conclusiones aplicables y útiles para la mejora de la gestión de aguas residuales industriales en Colombia.

3. DESARROLLO Y DISCUSIÓN

3.1. Tratamiento de aguas residuales industriales

El tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos industriales tiene como propósito eliminar o reducir los contaminantes que estas contienen antes de su vertimiento o de su reutilización, dicha contaminación varía en función del tipo de actividad productiva, e incluye desde materia orgánica fácilmente degradable hasta metales pesados, compuestos tóxicos o colorantes resistentes a procesos convencionales. Como lo señalan Metcalf & Eddy (2003), "las aguas residuales industriales pueden tener una composición química mucho más agresiva y compleja que las aguas residuales domésticas, lo que exige procesos más específicos y robustos".

En este sentido, el diseño de los sistemas de tratamiento debe considerar varios factores, tales como la carga contaminante, la variabilidad del flujo y los objetivos específicos de descarga o reúso. De acuerdo con Eaton et al. (2017), "los procesos de tratamiento deben diseñarse teniendo en cuenta la carga contaminante, la variabilidad del flujo, y los objetivos de descarga o reutilización". Es por ello, que se recurre a una secuencia de tratamientos físicos, químicos y biológicos organizados en distintas etapas: pretratamiento, tratamiento primario, secundario y terciario.

3.2. Tecnologías convencionales y sus limitaciones

En Colombia, la aplicación de tecnologías convencionales ha sido predominante dentro del sector industrial, en especial aquellas que están basadas en procesos como sedimentación, coagulación, floculación, filtración y el uso de sistemas biológicos con lodos activados, aunque estas metodologías han demostrado ser efectivas frente a ciertos contaminantes, presentan deficiencias importantes, principal mente cuando se deben de enfrentar a

sustancias más complejas, como los contaminantes persistentes o emergentes, en palabras de Bustos Murillo, Pulido Aponte y Rivera Escobar (2023), "los sistemas tradicionales de tratamiento no son suficientes para remover eficientemente sustancias como metales pesados, colorantes o hidrocarburos complejos".

Una problemática más, está en la generación de subproductos contaminantes como lodos con elevada carga orgánica o metálica que deben ser gestionados cuidadosamente para que se eviten impactos negativos sobre el medio ambiente, teniendo esto en cuenta, la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente establece que "los lodos generados en actividades de tratamiento de aguas residuales deben gestionarse de manera integral bajo criterios de minimización de riesgos para la salud y el ambiente".

La siguiente tabla presenta una comparación general entre las tecnologías convencionales y las tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales en el contexto industrial colombiano. Se incluyen criterios técnicos, operativos y económicos que permiten identificar las fortalezas y debilidades de cada enfoque. Este contraste evidencia cómo las tecnologías emergentes, aunque implican una inversión inicial más elevada, ofrecen ventajas significativas en términos de eficiencia en la remoción de contaminantes complejos, reducción de subproductos y posibilidades de reutilización del agua, mientras que las tecnologías convencionales, si bien son más accesibles económicamente y ampliamente implementadas, presentan limitaciones técnicas frente a contaminantes de difícil degradación y generan mayores volúmenes de residuos secundarios.

Tabla 2. Comparación técnica entre tecnologías convencionales y emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales

Criterio	Tecnologías convencionales	Tecnologías emergentes
Eficiencia frente a metales pesados	Baja (requieren tratamientos secundarios)	Alta (ej. electrocoagulación, AOPs)
Eliminación de colorantes	Limitada en procesos biológicos	Alta eficiencia (ej. AOPs, centrifugación)
Generación de subproductos	Alta (ej. lodos con carga tóxica)	Menor generación de residuos secundarios
Automatización	Generalmente baja	Alta posibilidad de automatización y control electrónico
Reutilización del agua	Limitada	Viable en procesos con membranas y tecnologías de alta pureza
Costo de inversión inicial	Bajo o medio	Alto, pero con recuperación a largo plazo
adaptabilidad industrial	Variable según industria	Alta adaptabilidad a sectores específicos

Nota. Tomado de Hong, X., Han, Z., Xing, J., Xiao, N., Ding, Y., Wei, G., Wang, X., & Zhang, H. (2025). Recent advances in membrane and integrated processes for the removal of nanoplastics from water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

3.3. Tecnologías emergentes

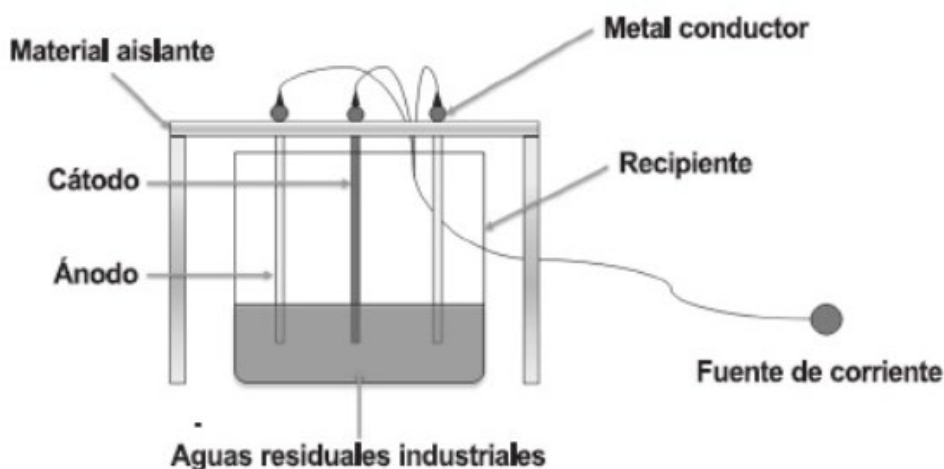
Las tecnologías emergentes aplicadas al tratamiento de aguas industriales representan una alternativa prometedora frente a las limitaciones de los métodos tradicionales, estas soluciones innovadoras se orientan a mejorar la eficiencia en la eliminación de contaminantes específicos, minimizar la generación de residuos secundarios y facilitar el reúso del recurso hídrico, como exponen Rodríguez Fernández-Alba et al. (2012), "las tecnologías emergentes representan un cambio de paradigma en el tratamiento de efluentes industriales, al enfocarse en la eficiencia energética, la automatización y la selectividad en la eliminación de contaminantes". Entre las tecnologías más destacadas se encuentran la electrocoagulación, los procesos de oxidación avanzada (AOPs), la filtración por membranas, la centrifugación y los sistemas bioelectroquímicos. Cada una de ellas posee ventajas técnicas particulares, que se analizan en los apartados siguientes.

3.3.1. Electrocoagulación

La electrocoagulación consiste en la aplicación de corriente eléctrica para desestabilizar contaminantes presentes en el agua, lo cual favorece su agrupación y posterior sedimentación. Esta técnica ha evidenciado alta eficiencia en la remoción de colorantes, metales pesados y sólidos suspendidos. Según Mollah, Schennach, Parga y Cocke (2001), "la electrocoagulación permite una coagulación in situ generada por la disolución anódica de metales, ofreciendo un tratamiento altamente eficiente sin requerir coagulantes químicos añadidos".

Diversos estudios han resaltado sus ventajas frente a métodos tradicionales. Moussa, El-Naas, Nasser y Al-Marri (2017) afirman que "la electrocoagulación presenta importantes ventajas frente a la coagulación química, como la menor producción de lodos y la reducción del consumo de productos químicos". Teniendo esta misma idea, Khandegar y Saroha (2013) destacan que "la versatilidad de la electrocoagulación la convierte en una opción viable para sectores como el textil, curtimbres y la industria del metal".

Ilustración 4. " Sistema de electrocoagulación



Nota. Tomado de Morales Posada, N. B., & Acosta Niño, G. E. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 33–44. <https://doi.org/10.18359/rcin.282>

3.3.2. Procesos de oxidación avanzada (AOPS)

Los AOPs emplean radicales libres de alta reactividad capaces de oxidar compuestos orgánicos complejos que no pueden ser tratados eficazmente mediante tecnologías convencionales. Estos procesos incluyen ozonización, peroxidación, fotocatalisis y diversas combinaciones entre ellos. Según Metcalf & Eddy (2003), "los AOPs son especialmente útiles para tratar efluentes industriales con pesticidas, fenoles, fármacos y colorantes sintéticos". Aunque su implementación puede implicar costos energéticos elevados y requiere condiciones operativas controladas, su alta eficiencia ha sido validada en sectores como la industria farmacéutica, petroquímica y textil.

Ilustración 5. "Proceso de oxidación avanzada".

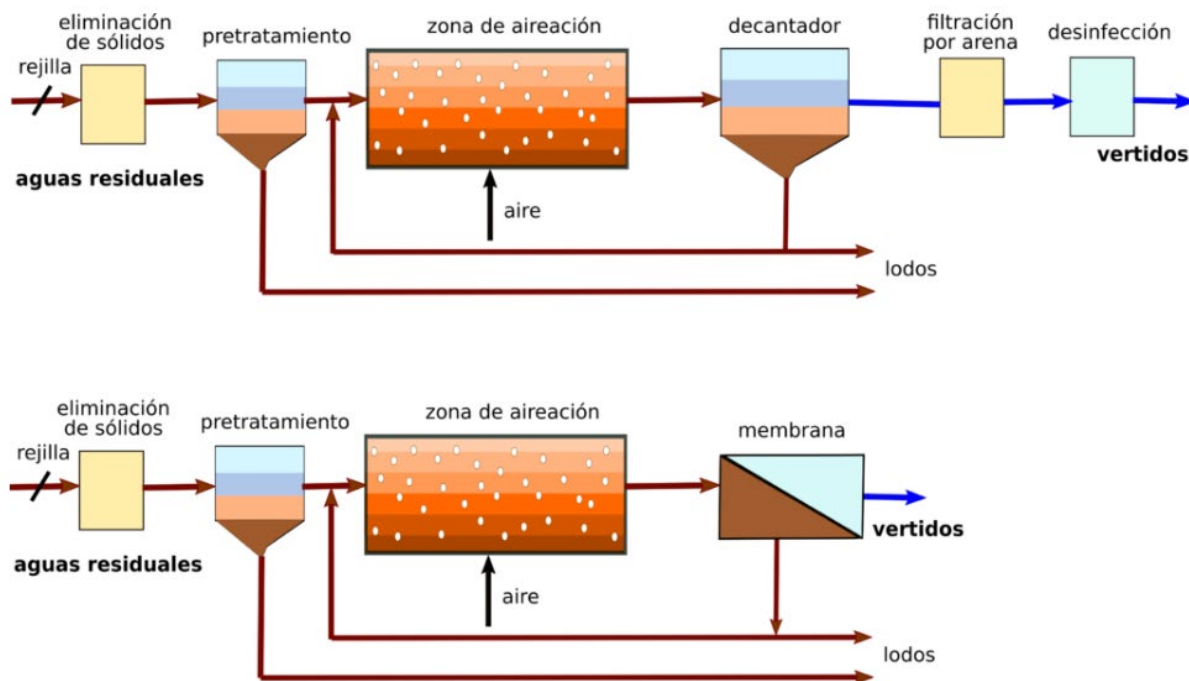


Nota. Tomado de Borja, J. (2016). PTAR (Planta de tratamiento de aguas residuales). En Servicios complementarios. CentroAguas S. A. E. S. P. Recuperado el 23 de julio de 2025 de <https://www.centroaguas.com/index.php/servicios/servicios-complementarios/sistema-de-succion-presion/12-servicios/servicios-complementarios/21-ptar>

3.3.3. Filtración por membranas

La filtración por membranas abarca tecnologías como la ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, que permiten separar contaminantes en función de su tamaño molecular. Estas soluciones son particularmente efectivas en la eliminación de sólidos disueltos, microorganismos y sales, lo que las convierte en herramientas clave para el reúso de agua de alta calidad. Tal como lo afirman Eaton et al. (2017), "las membranas se aplican con frecuencia en tratamientos terciarios cuando se requiere una alta calidad del efluente para reutilización". A pesar de los desafíos asociados al mantenimiento y ensuciamiento de las membranas, su modularidad y eficiencia las posicionan como alternativas estratégicas en industrias que demandan estándares elevados de calidad hídrica.

Ilustración 6. "Biorreactores de membrana en aguas residuales: solución innovadora para la depuración efectiva".



Nota. Tomado Triviño-Pineda, J. S., & Sánchez-Ramírez, J. E. (2023). Evaluación de tecnologías de tratamiento en PTAR de pequeña escala. *Revista Ingeniería*, 28(1), 45–60.

3.3.4. Centrifugación

En Colombia, los procesos de tratamiento de aguas residuales se sustentan principalmente en metodologías convencionales como la sedimentación, la flotación, la filtración por gravedad y el espesamiento mecánico. Si bien estas técnicas han demostrado ser funcionales en diferentes contextos, presentan limitaciones operativas frente a los volúmenes y características de los lodos generados en vertimientos industriales y municipales. Por ejemplo, la sedimentación depende en gran medida de la composición y densidad de los sólidos, lo que reduce su eficacia en efluentes con alta carga orgánica o partículas finas. De igual forma, la flotación requiere una dosificación precisa de reactivos y un control constante de aireación, mientras que la filtración tradicional tiende a saturarse con rapidez, incrementando los costos de mantenimiento y disposición final.

Frente a estas limitaciones, la centrifugación surge como una alternativa eficaz y versátil. Esta técnica se basa en la aplicación de fuerza centrífuga para separar los sólidos del líquido, siendo ampliamente utilizada en la deshidratación de lodos y la eliminación de partículas densas. Según Bustos Murillo, Pulido Aponte y Rivera Escobar (2023), "la centrifugación permite reducir hasta un 60% el volumen de lodos generados en procesos industriales, facilitando su disposición y reduciendo costos" (p. 121). Además de disminuir el volumen de residuos, mejora sus propiedades fisicoquímicas: Wang, Zhang, Dai y Wang (2022) señalan que "la centrifugación puede aumentar la capacidad de amortiguación ácida de los lodos, contribuyendo a una estabilización más eficiente del residuo" (p. 3). En este sentido, la EPA (s.f.) respalda esta técnica al considerarla una tecnología madura y de alta aplicabilidad en plantas de tratamiento tanto industriales como municipales.

Aunque la centrifugación no se considera una tecnología emergente a nivel global, en el contexto colombiano podría clasificarse como una tecnología de aplicación emergente o incipiente, debido a su bajo nivel de implementación. La mayoría de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) en el país continúan empleando métodos tradicionales como la sedimentación o la filtración por gravedad, mientras que el uso de

centrífugas industriales es aún limitado, restringido principalmente a sectores con alta capacidad tecnológica o a proyectos piloto. Esta baja adopción se explica por factores como los altos costos iniciales de inversión, la falta de personal especializado y la escasa disponibilidad de equipos en el mercado nacional. Sin embargo, su potencial para optimizar la gestión de lodos, reducir residuos y mejorar la eficiencia global del tratamiento la posiciona como una opción con características emergentes dentro del panorama colombiano. Promover su implementación podría representar un paso decisivo hacia la modernización tecnológica del sector y el cumplimiento de las metas de sostenibilidad hídrica y eficiencia energética del país.

En términos comparativos, la centrifugación ofrece ventajas sustanciales frente a las metodologías convencionales: permite una separación más rápida y controlada, reduce la dependencia de parámetros químicos y requiere menor espacio físico, lo que resulta particularmente beneficioso para plantas urbanas con limitaciones de terreno. Asimismo, la reducción significativa del volumen de lodos se traduce en ahorros económicos importantes en transporte y disposición final, aspectos críticos para muchas plantas colombianas con recursos limitados. En este sentido, la incorporación progresiva de sistemas de centrifugación podría fortalecer la capacidad operativa de las plantas de tratamiento nacionales, disminuir el impacto ambiental y mejorar la sostenibilidad del manejo de aguas residuales, contribuyendo de forma directa a los objetivos de desarrollo sostenible en materia de agua y saneamiento.

3.4. Marco normativo colombiano en tratamiento de aguas residuales

Colombia ha consolidado un conjunto normativo que regula el manejo y vertimiento de aguas residuales industriales, estableciendo límites y procedimientos para minimizar los impactos ambientales. Entre las normas más relevantes se encuentran:

- Decreto 1594 de 1984, que clasifica los cuerpos de agua y regula los usos del recurso hídrico y residuos líquidos.
- Decreto 3930 de 2010, que formula lineamientos para el uso sostenible del agua.
- Ley 1333 de 2009, que define el régimen sancionatorio para infracciones ambientales, incluyendo vertimientos ilegales.
- Resolución 0631 de 2015, que establece los valores máximos permisibles para vertimientos en cuerpos de agua superficiales.
- Resoluciones 0883 y 0699 de 2018 y 2021, que reglamentan el monitoreo y seguimiento de vertimientos.

El Ministerio de Ambiente (2015) establece que "todo vertimiento que supere los parámetros establecidos constituye una infracción ambiental, sujeta a sanción conforme a la Ley 1333 de 2009" (art. 6). Asimismo, la Resolución 0631 incorpora límites diferenciados según la actividad económica, incluyendo sectores como curtiembres, metalurgia, industria textil, farmacéutica, agroindustria, entre otros.

En este marco regulatorio, resulta fundamental considerar los parámetros físico-químicos que definen la calidad de los efluentes vertidos, pues constituyen la base técnica para evaluar el cumplimiento ambiental de las plantas de tratamiento. La *Resolución 0631 de 2015* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015), complementada por disposiciones posteriores, establece límites cuantitativos específicos que deben cumplir los vertimientos en función de su destino final, ya sea cuerpo de agua superficial o sistema de alcantarillado. Estos parámetros incluyen indicadores de carga orgánica, sólidos, grasas, nutrientes y metales pesados, entre otros, que permiten determinar la eficiencia del tratamiento aplicado y su compatibilidad con los estándares ambientales nacionales. A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores máximos permisibles para los principales parámetros fisicoquímicos de los efluentes tratados, conforme a la normativa colombiana vigente.

Tabla 3. Límites permitidos para efluentes tratados según tipo de actividad

Sector / tipo de actividad	Parámetro	Unidad	Límite máximo permisible
Alimentos y bebidas	pH	unidades	6,0 – 9,0
	DQO	mg O ₂ /L	600 (general) / 200 (bebidas, malta, alimentos animales)
	DBO ₅	mg O ₂ /L	400 (general) / 100 (bebidas, malta, alimentos animales)
	SST	mg/L	200 (general) / 50 (bebidas, malta)
	Grasas y Aceites	mg/L	20 (general) / 10 (bebidas, malta)
	Sólidos sedimentables	mL/L	2,0 (general) / 1,0 (bebidas, malta)
	Textil	pH	unidades
DQO		mg O ₂ /L	600
DBO ₅		mg O ₂ /L	300
SST		mg/L	75
Fenoles totales		mg/L	0,20
Grasas y Aceites		mg/L	30
Curtiembres (industria del cuero)		pH	unidades
	DQO	mg O ₂ /L	900
	DBO ₅	mg O ₂ /L	350
	SST	mg/L	300
	Cromo total (Cr)	mg/L	1,0
	Sulfuros totales	mg/L	1,0
	Grasas y Aceites	mg/L	30
Industria química y farmacéutica	pH	unidades	6,0 – 9,0
	DQO	mg O ₂ /L	700
	DBO ₅	mg O ₂ /L	350
	SST	mg/L	150
	Amonio (NH ₄ ⁺)	mg/L	10
	Aceites y Grasas	mg/L	20
	Compuestos fenólicos	mg/L	0,50
Agroindustria (caña, palma, café, lácteos)	pH	unidades	6,0 – 9,0
	DQO	mg O ₂ /L	600
	DBO ₅	mg O ₂ /L	300
	SST	mg/L	150
	Grasas y Aceites	mg/L	20
	Nitrógeno total	mg/L	40
	Metalurgia y galvanoplastia	pH	unidades
DQO		mg O ₂ /L	300
DBO ₅		mg O ₂ /L	150
SST		mg/L	100
Cromo total (Cr)		mg/L	0,5
Níquel (Ni)		mg/L	1,0
Zinc (Zn)		mg/L	2,0
Hierro total (Fe)		mg/L	10
Doméstico municipal (ptar)	pH	unidades	6,0 – 9,0
	DQO	mg O ₂ /L	300
	DBO ₅	mg O ₂ /L	150
	SST	mg/L	100
	Grasas y Aceites	mg/L	25
	Coliformes fecales	NMP/100 mL	10 ⁴
	Sólidos sedimentables	mL/L	1,0

Nota. Tomado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015*, “Por la cual se establecen los parámetros y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público”. *Diario Oficial No. 49.523*.

3.5. Análisis general de las tecnologías emergentes identificadas

El estudio realizado permitió identificar un grupo de tecnologías emergentes con un elevado potencial para ser aplicadas en el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia, estas opciones tecnológicas se destacan por su eficiencia, capacidad de adaptación, automatización y por generar menos residuos en comparación con los métodos tradicionales, a partir de un análisis técnico, metodológico y documental, se definieron cuatro tecnologías: electrocoagulación, procesos de oxidación avanzada (AOPs), sistemas de membranas y centrifugación.

Cada una de estas tecnologías parte de principios operativos diferentes y está orientada a superar las limitaciones que presentan los tratamientos convencionales, como la sedimentación, la coagulación química o el uso de lodos activados, los cuales no logran ser eficaces frente a contaminantes más complejos como metales pesados, colorantes sintéticos o compuestos orgánicos que tienden a resistir la degradación.

3.5.1. Búsqueda bibliográfica

Tabla 4. Fuentes bibliográficas consultadas para el estudio de tecnologías emergentes en el área de tratamiento de aguas residuales

Nº	Título del artículo	Autores	Año	Fuente / Revista	Base de datos	País de estudio	Tipo de tecnología emergente	Industria o sector/ Tipo de aguas residuales	Rangos de remoción de contaminantes antes	Principales hallazgos	Ventajas	Limitaciones
1	Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados...	Bustos Murillo, F. A. et al.	2023	Vínculos	SciELO	Colombia	Centrifugación	Curtimbre / Industriales	DQO 75-90% N-P 60-85%	Reducción de lodos y mejora de eficiencia	Bajo costo, fácil aplicación	No remueve compuestos disueltos
2	Electrocoagulation (EC)— Science and applications	Mollah, M. Y. A. et al.	2001	Journal of Hazardous Materials	ScienceDirect	EE.UU.	Electrocoagulación	Textil, general/ Industriales	DQO 80-98% Color 85-99% Metales 70-95%	Alta eficiencia en metales pesados y DQO	No requiere químicos externos	Formación de lodos secundarios
3	Application of electrocoagulation process for dairy wastewater treatment	Bazrafshan, E. et al.	2012	Journal of Chemistry	Hindawi	Irán	Electrocoagulación	Industria láctea/ Industriales	DQO 80-98% Metales 85-99% Color 70-95%	Alta remoción de turbidez y contaminantes orgánicos	Económico y efectivo	Generación de lodos
4	A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment	Moussa, D. T. et al.	2017	Journal of Environmental Management	ScienceDirect	Global	Electrocoagulación	Variada/ Industriales	DQO 80-98% Metales 85-99% Color 70-95%	Aplicable en múltiples industrias, adaptable	Versatilidad, buena eficiencia	Dependencia del pH y conductividad
5	Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos	Bustos Murillo, F. A. et al.	2023	Tecnura	DOAJ	Colombia	Bioelectroquímicas	General/ Mixtas	DQO 75-90% N, P 60-85%	Aplicabilidad local, enfoque sostenible	Bajo consumo energético	Baja implementación práctica
6	Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment	Oturan, M. A. & Aaron, J. J.	2014	Critical Reviews in Env. Sci. and Tech.	Taylor & Francis	Global	AOPs	Química, farmacéutica/ Industriales	DQO 80-98% microp 60-90%	Alta eficacia en degradación de compuestos recalcitrantes	Alta remoción sin residuos tóxicos	Costo elevado, tecnología compleja

7	Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales: Informe de vigilancia tecnológica	Rodríguez Fernández-Alba, A. et al.	s.f.	Informe técnico	[Sin editorial]	España	AOPs Electrocoagulación	Variada/ Industriales	DQO 80-98% microp 60-90%	Análisis prospectivo y tecnológico en sectores industriales	Evaluación comparativa	Escasa documentación para LATAM
8	Gravity settling and centrifugation increase the acid buffer capacity of sewage sludge	Wang, J. et al.	2022	Science of The Total Environment	ScienceDirect	China	Centrifugación	Tratamiento de lodos/ Lodos residuales	DQO >90% metales 85-97% ST 70-90%	Aumento de estabilidad química del lodo	Mejora del proceso biológico	No remueve compuestos disueltos
9	Emerging bioelectrochemical technologies for wastewater remediation	Shamshad, J. & Rehman, R. U.	2024	Environmental Nanotechnology...	Elsevier	Global	Bioelectroquímicas	Variada/ Industriales	DQO 75-90% N, P 60-85%	Tecnologías prometedoras, ecológicas	Innovadoras, bajas emisiones	En fase experimental
10	Desempeño de membranas de nanofiltración en el tratamiento de efluentes industriales	López, A. et al.	2020	Ingeniería y Competitividad	SciELO	Colombia	Membranas	Textil/ Industriales	Microplásticos 90-99% N, Sales 85-95%	Remoción de color superior al 97 %	Alta eficiencia de separación	Ensuciamiento y alto mantenimiento
11	Integrated electrodes for the nutrient removal from municipal wastewater using electrocoagulation technology	Emana, Bilisa BultiaSend mail to Emanab.B.; Bulge, Tsehay Bulti	2025	Scientific Reports	Scopus	Ethiopia	AOPs	Ingeniería Química/ Domesticas	DQO 80-98% Metales 70-95%	Eficiencia de remoción de contaminante con diferentes tipos de ánodos conductores	Alta eficiencia de purificación de agua con costos diversos y selectividad	Fase experimental a nivel laboratorio no listo para industrialización

12	Electrocoagulation and electrooxidation coupling process for treating high COD electrophoretic coating wastewater using response surface methodology	Yu, Wenzha,b Wu, Ninga Liu, Shengkaia Shi, Haitinga Zhu, Boc Wu, Xianyand Wang, Weia,b Xu, Zhiweia,b	2025	Separation and Purification Technology	Scopus	China	AOPs	Ingeniería ambiental / Mixtas	DQO 99-95% Color 85-95% Fenoles 60-85%	Mejoramiento y alta eficiencia en tratamiento de aguas residuales con alto DQO	Disminución de DQO en agua residuales tratadas mediante metodología de electrocoagulación que pueden ser seguidos mediante modelos matemáticos elaborados, posible facilidad en la implementación industrial	Altos costos relacionados a la eficiencia de los ánodos y los recubrimientos necesarios para su uso, condiciones específicas necesarias para su uso a nivel industrial
13	Integration of electrocoagulation and electrooxidation for continuous mode treatment of tannery effluents: Experimental, optimization, and economic analysis	Meena, Sanjeev Kumar;Meena, Shv Om;Sangal, Vikas K.;Deharia, Neetesh Kuma	2025	Journal of Water Process Engineering	Scopus	India	AOPs	Ingeniería Química/ Mixtas	DQO 80-98% Metales 70-95% Color 85-99%	Optimización experimental mediante usos de cátodos y ánodos para purificación.	Optimización de metodologías ya aplicadas mejoramiento de costos	Optimizaciones bajas en comparación a lo que se busca
14	Nanofiltration as an effective tertiary treatment for the removal of micro- and nanoplastics from municipal water effluent	Russo, Beatric, Lavorato, Cristina, Argurio, Pietro, Limonti, Carlo; Siciliano, Alessio; Figoli, Alberto; Poerio, Teresa	2025	Separation and Purification Technology	Scopus	Italia	Membranas	Ingeniería ambiental / Domesticas	Microplásticos 90-99% Sales 85-95%	Descontaminación de microplásticos en afluentes de aguas residuales domesticas del mediante el uso de membranas de filtración permeables de cerámicos	Disminución del 98% de agentes plasticos en aguas residuales domesticas, tratamiento realizados in situ en una planta funcional, sin ninguna adición de ayudas químicas para el tratamiento.	Disminución de caudales de trabajo, saturación del filtro lo cual requiere un tratamiento de lavado constante

15	Efficient and simultaneous recovery of ammonia and carbon from municipal wastewater by the combination of direct membrane filtration (DMF) and the use of a membrane contactor	Ito, Yui; Hafuka, Akira; Kimura, Katsuki	2025	Water Research	Scopus	Japon	Membranas	Ingeniería ambiental / Domesticas	Micro plásticos Sales 85-95%	Recuperación eficiente de compuestos útiles dentro de las aguas residuales domésticas.	Se logro la recuperación de compuestos de carbono y amoniaco de las aguas residuales comunes o domésticas, los cuales pueden ser útiles en otro tipo de industrialización.	Interrupción de procesos por mantenimientos constantes de las membranas de utilización de condiciones altamente alcalinos no aptos para tratamientos primarios mas comunes como los biológicos.
16	Recent advances in membrane and integrated processes for the removal of nanoplastics from water and wastewater	Hong, Xiangfeng; Han, Zixi; Xing, Jiajian; Xiao, Nan; Ding, Yuesong; Wei, Gaoliang; Wang, Xin; Zhang, Haiguang.	2025	Journal of Environmental Chemical Engineering	Scopus	China	Membranas	Ingeniería ambiental / Aguas y Mixtas	Micro plásticos Sales 85-95%	Se realizo una revisión sobre el avance de diversas nuevas tecnologías de membrana para el tratamiento de aguas y aguas residuales como un pretratamiento y tratamientos primarios.	Se enlistas avances significativos en el área de uso de membranas como medio de tratamientos de aguas residuales, explica estas como una buena metodología para su implementación.	Explica altos costos asociados a los mantenimientos constantes ligado al uso de membranas de cualquier tipo.
17	Textile Wastewater Treatment for Basic Fuchsin Dye Removal using Highly Efficient Nano Earthenware Clay in Fixed-Bed Reactors	Yadav, Jiten; Chahal, Surjeet; Kashyap, Vikas; Saxena, Kapil; Kumar, Chandra	2025	Water, Air, and Soil Pollution	Scopus	India	Membrana/ Centrifugación	Ingeniería ambiental / Industrias Área textil	DQO 80-90% Color 85-95%	Usos de nanoarcillas como medio de absorción en aguas residuales textiles	Eliminación de contenido de colorantes altamente contaminantes, con una buena tasa de regeneración.	No se habla sobre el proceso de recuperación de colorantes útiles para la misma industria que ayuda.
18	A novel magnetic adsorption and capacitive deionization coupled	Wang, Shuo; Wang, Hongjie; Huang, Xinyuan;	2025	Water Research	Scopus	China	AOPs	Ingeniería ambiental / Industrias	DQO 75-90% Sales y Metales 85-97%	Usos de adsorción magnética para desalinización	Altas tasas de desalinización para aguas industriales y aguas provenientes	No probado a escala industrial posible problemas de mantenimiento energético.

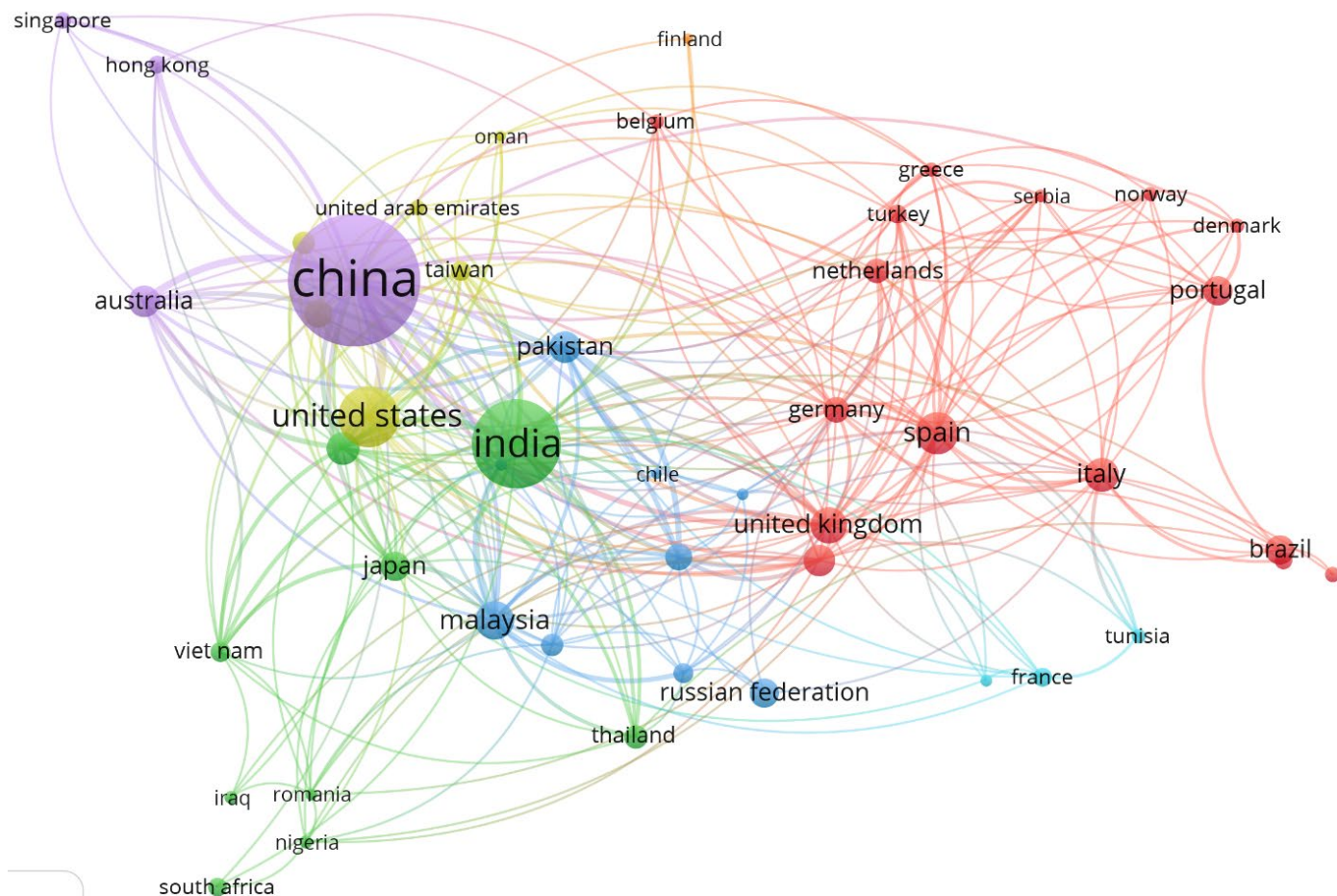
	technology for industrial saline wastewater recycling	Wu, Zefeng; Xue, Hongyang; Zhao, Chunxia.								n de aguas industriales.	de fuentes marinas.	
19	Integrated Electrocoagulation-Flotation Process: A Comparative Study for Employing Fe/Al Electrodes in Tanta Wastewater Treatment Plant Influent	Emara, Mostafa M; Farid, Nazik A. ; EL-Kholly, Heba K.; Eltalawy, Abdelatty G	2025	Egyptian Journal of Chemistry	Scopus	Egipto	AOPs	Ciencias Químicas / Mixtas	DQO 08-98% Color 70-95% Metales 70-95%	Se demostró como el tipo de conexión de los electrodos usados pueden generar optimización en el tratamiento de aguas residuales teniendo como base análisis rutinarios tales como DBO; DQO, SST.	Al usar los electrodos clásicos, pero con un tipo de conexión monopolar en serie se consiguen un alto impacto de descontaminación con una disminución significativa de costos de operativos	No motiva a uso de nuevos electrodos y no hay pruebas in situ de planta solo pruebas de laboratorio.
20	Integrated decision support model for selection of industrial wastewater treatment technologies	Liu, Zhea.; Letchmunan, Sukumarb; Deveci, Muhammet c.; Senapati, Tapanf,g,h; Pamucar, Dragan	2025	Expert Systems with Applications	Scopus	China	Selección sistemática de metodologías para uso industrial	Ingeniería de sistemas / Mixtas	No aplica para datos de Remoción de contaminantes antes	Se propuso un modelo de apoyo para la selección de metodologías de tratamiento de aguas residuales para la toma de decisiones en el diseño de PTARs	Soporte automatizado para la toma de decisiones de técnicas de tratamientos de aguas residuales y en la construcción de infraestructura especializada para este fin. Disminución de costos y simplificación de diseño	Fase de pruebas con sistemas y configuraciones ya conocidas, no se tienen datos con sistemas pensados desde cero.

Nota. Elaboración propia

3.5.2. Análisis bibliométrico

El presente mapa bibliométrico muestra la distribución geográfica de la producción científica y las redes de colaboración internacional en torno al tratamiento de aguas residuales emergentes. A través de la visualización, es posible identificar los países que concentran el mayor número de publicaciones y conexiones, lo que refleja no solo su capacidad investigativa, sino también su posicionamiento como líderes en el desarrollo e implementación de soluciones tecnológicas para este campo. Este tipo de análisis resulta fundamental, ya que permite comprender las dinámicas de cooperación entre naciones, detectar los focos de mayor actividad científica y reconocer las oportunidades para fortalecer la investigación en regiones con menor presencia académica. Además, brinda un punto de partida para diseñar estrategias de integración y transferencia de conocimientos que puedan favorecer a territorios como Colombia, donde la gestión de aguas residuales es un reto ambiental y social de gran relevancia.

Ilustración 8. Análisis bibliométrico por países.



Nota. Elaboración propia

Al analizar en detalle el mapa, se observa que países como China, India y Estados Unidos destacan por la densidad de sus redes de colaboración y la cantidad de publicaciones generadas. Este protagonismo se entiende no solo por su peso demográfico, que incrementa la demanda de soluciones para el tratamiento de aguas residuales, sino también por su capacidad de inversión en investigación y desarrollo. Curiosamente, estas mismas naciones son, a su vez, algunas de las más contaminantes y con mayores necesidades de purificación de recursos hídricos debido a su intenso desarrollo industrial. Esto crea un doble escenario: por un lado, la urgencia de implementar tecnologías más eficientes para el tratamiento de aguas; y por otro, la capacidad de generar innovaciones que puedan ser transferidas a otros contextos. Las tecnologías emergentes desarrolladas en estos países —como procesos avanzados de oxidación, sistemas de membranas de alta eficiencia o métodos de

electrocoagulación— representan soluciones potencialmente adaptables a la realidad colombiana, siempre que se establezcan mecanismos efectivos de cooperación y ajuste tecnológico.

La lectura de este mapa no solo permite identificar a los países líderes en producción y colaboración científica, sino también resalta la importancia de la cooperación internacional como un mecanismo clave para distribuir el conocimiento y las tecnologías emergentes hacia regiones con menor capacidad de investigación y desarrollo. En el caso colombiano, estas colaboraciones pueden materializarse mediante convenios bilaterales entre universidades y centros de investigación, participación en proyectos multinacionales financiados por organismos como la ONU o el Banco Mundial, y programas de transferencia tecnológica impulsados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación en alianza con el sector privado. La transferencia de conocimientos, el intercambio de buenas prácticas y la formación de capacidades locales son estrategias que, sumadas a la producción científica nacional, pueden acelerar la implementación de soluciones sostenibles. En este sentido, el mapa no solo refleja el estado actual de la colaboración, sino que también sirve como una guía estratégica para identificar las conexiones que deben fortalecerse y los vacíos de cooperación que podrían convertirse en oportunidades para un impacto ambiental y social más amplio en el territorio colombiano.

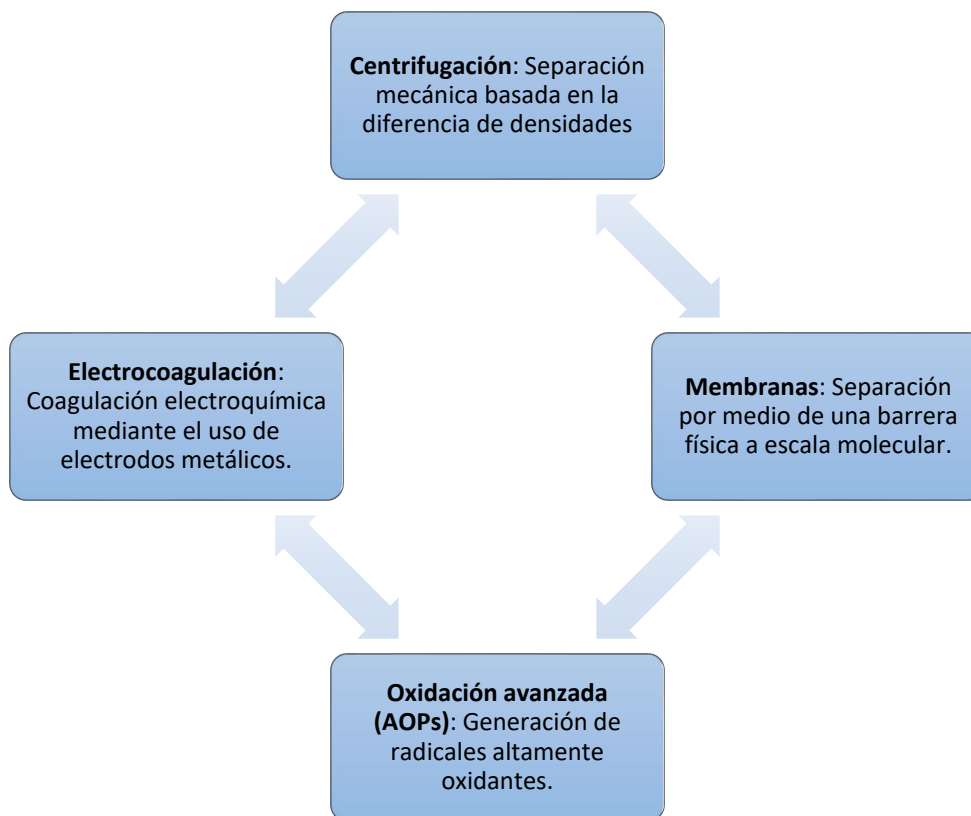
El análisis bibliográfico basado en las palabras clave, junto con el mapeo de densidad de términos, revela que las investigaciones internacionales se concentran principalmente en el concepto central de *wastewater treatment*, alrededor del cual gravitan temas como *water treatment*, *chemical oxygen demand*, *oxidation*, *coagulation*, *membrane technology* y *microbial fuel cells*. Esta concentración sugiere que el tratamiento de aguas residuales sigue siendo el eje articulador de las innovaciones tecnológicas, con especial atención a procesos de oxidación y a soluciones basadas en membranas, que están estrechamente relacionadas con las tecnologías emergentes para remover contaminantes persistentes. Asimismo, la presencia destacada de términos como *bioreactor*, *biodegradation*, *water pollution* y *photocatalysis* indica un interés creciente en enfoques integrados que combinan procesos físico-químicos y biológicos. En el contexto colombiano, esta tendencia cobra relevancia al alinearse con la normatividad ambiental vigente, que impulsa la adopción de tratamientos más avanzados para cumplir parámetros de vertimiento exigentes. El patrón de densidad observado refuerza la necesidad de vincular innovación, marco regulatorio y adaptación tecnológica a las condiciones locales para responder eficazmente a los retos actuales en la gestión del recurso hídrico.

El análisis bibliométrico previo evidenció que la investigación sobre electrocoagulación, normatividad ambiental en Colombia, oxidación avanzada, tecnologías emergentes y tratamiento de aguas residuales ha mostrado un incremento sostenido en la última década, con un notable auge en los últimos cinco años. Este crecimiento responde a la presión regulatoria y a la necesidad de innovar en métodos capaces de remover contaminantes que los tratamientos convencionales no logran eliminar.

Al complementar este hallazgo con el mapeo de densidad de términos, se observa que el concepto central de tratamiento de aguas residuales concentra la mayor actividad investigativa, rodeado de núcleos temáticos como tratamiento de agua, demanda química de oxígeno, oxidación, coagulación, tecnología de membranas y celdas de combustible microbianas. Esta distribución confirma que las líneas emergentes priorizan procesos de oxidación avanzada, tecnologías de membranas y soluciones bioelectroquímicas, en estrecha relación con los desafíos identificados en la bibliometría. Asimismo, términos como biorreactor, biodegradación, contaminación del agua y fotocatalisis refuerzan la tendencia hacia sistemas híbridos que integran procesos físico-químicos y biológicos.

En el contexto colombiano, esta convergencia entre los resultados bibliométricos y el mapa de densidad indica que las tendencias globales están alineadas con las exigencias de la normatividad ambiental, particularmente en lo referente a la reducción de la demanda química de oxígeno (DQO) y la eliminación de contaminantes emergentes. Esto subraya la necesidad de fomentar la transferencia y adaptación de tecnologías avanzadas al marco regulatorio y a las características propias de los efluentes industriales en el país.

Ilustración 8. "Clasificación de las tecnologías emergentes según su principio de tratamiento.



Nota. Elaboración propia

A continuación, se presenta una breve síntesis de los principios operativos y sus aplicaciones:

- **Electrocoagulación:** "La electrocoagulación permite una coagulación in situ generada por la disolución anódica de metales, ofreciendo un tratamiento altamente eficiente sin requerir coagulantes químicos añadidos" (Mollah et al., 2001).
- **AOPs:** "Los AOPs son especialmente útiles para tratar efluentes industriales con pesticidas, fenoles, fármacos y colorantes sintéticos" (Metcalf & Eddy, 2003).
- **Membranas:** "Las membranas se aplican con frecuencia en tratamientos terciarios cuando se requiere una alta calidad del efluente para reutilización" (Eaton et al., 2017).
- **Centrifugación:** "La centrifugación incrementa la capacidad tampón ácida de los lodos, mejorando su estabilización y eficiencia de secado" (Wang et al., 2022).

3.5.4. Características técnicas y operativas comparativas

Estas tecnologías emergentes presentan diferencias claras en cuanto a su aplicabilidad, eficiencia y complejidad operativa. En la siguiente tabla se resumen algunas de las variables importantes que permiten compararlas:

Tabla 5. "Comparación técnica y operativa de tecnologías emergentes"

Tecnología	Eficiencia de remoción	Tipo de contaminantes tratados	Automatización	Subproductos generados	Requiere insumos químicos
Electrocoagulación	Alta	Metales pesados, colorantes, sólidos suspendidos	Media	Moderados	No
AOPs	Muy alta	Orgánicos recalcitrantes, pesticidas, fármacos	Alta	Bajo	Sí
Membranas	Alta	Sólidos disueltos, sales, microorganismos	Alta	Bajo	No
Centrifugación	Media-alta	Sólidos densos, lodos industriales	Alta	Medio	No

Nota. Elaboración propia adaptado de Moussa et al. (2017), Rodríguez Fernández-Alba et al. (s.f.) y Bustos Murillo et al. (2023).

3.5.5. Grado de madurez tecnológica (TRL) y estado de implementación

Para evaluar que tan desarrolladas están estas tecnologías, se utilizó la escala Technology Readiness Level (TRL), que permite identificar si una tecnología aún está en fase experimental, si se encuentra en etapa piloto o si ya se usa a nivel industrial.

Tabla 6. "Nivel de madurez tecnológica (TRL) y estado de implementación en Colombia"

Tecnología	Madurez tecnológica (trl)	Estado de implementación en Colombia
Electrocoagulación	8–9	Alta en curtiembres y textil
AOPs	7–8	Fase piloto en industrias farmacéutica y petroquímica
Membranas	9	Uso moderado en industrias alimentaria, química y farmacéutica
Centrifugación	9	Extendida en plantas urbanas e industria papelera

Nota. Elaboración propia; con base en Mollah et al. (2004), Bustos Murillo et al. (2023) y Moussa et al. (2017).

De este análisis se desprende que:

- “La electrocoagulación y la centrifugación ya alcanzaron un nivel de madurez tecnológica alto y tienen presencia en varios sectores industriales, Según indica Bustos Murillo et al. (2023), “la centrifugación permite reducir hasta un 60% el volumen de lodos generados en procesos industriales, facilitando su disposición y reduciendo costos. Por su parte, Mollah et al. (2004) afirman que la electrocoagulación ha alcanzado un nivel de madurez que permite su aplicación comercial, especialmente en países en desarrollo con limitaciones tecnológicas.”
- “Las tecnologías basadas en membranas muestran un uso cada vez más frecuente, sobre todo en procesos que requieren reúso o deben cumplir con normativas ambientales, como lo indica Eaton et al. (2017) sostienen que las membranas se aplican con frecuencia en tratamientos terciarios cuando se requiere una alta calidad del efluente para reutilización.”
- “Aunque los AOPs ofrecen resultados notables, todavía enfrentan barreras como los costos operativos y la disponibilidad de equipos en el mercado nacional, lo cual limita su implementación a gran escala por ahora.”

Rodríguez Fernández-Alba et al. (2012) explican que la aplicación de tecnologías de oxidación avanzada en aguas residuales industriales todavía está condicionada por su complejidad técnica y costes energéticos elevados.”

Este análisis general permite mostrar que las tecnologías emergentes seleccionadas son propuestas teóricas, y también cuentan con respaldo técnico, un grado significativo de madurez tecnológica y experiencias concretas de implementación en el contexto colombiano.

3.6. Evaluación de eficiencia y viabilidad técnica

El análisis de eficiencia y viabilidad técnica de las tecnologías novedosas consideradas en esta investigación busca determinar qué tan efectivas son en la remoción de contaminantes y también si pueden ser integradas de manera realista a los procesos industriales en Colombia, las tecnologías evaluadas electrocoagulación, procesos de oxidación avanzada (AOPs), membranas y centrifugación se presentan como opciones más avanzadas frente a los métodos tradicionales, al ofrecer mejoras en eficiencia, adaptabilidad, automatización y calidad del efluente tratado. En este apartado se organizará respecto a tres partes: primero, se analizará la capacidad de cada tecnología para eliminar contaminantes comunes en vertimientos industriales, seguido de esto se examina su viabilidad técnica y finalmente, se describen las principales barreras que hoy dificultan su adopción masiva.

3.6.1. Análisis de eficiencia en la remoción de contaminantes

Las tecnologías emergentes han mostrado un rendimiento notable en la eliminación de distintos contaminantes, especialmente en sectores industriales con vertimientos que contienen alta carga orgánica, metales pesados, colorantes o sólidos suspendidos. A continuación, se presenta un resumen de la eficiencia técnica observada en condiciones reales:

- **Electrocoagulación:** Un estudio en Colombia reportó que “la mayor eficiencia en la remoción de contaminantes se alcanzó con un tiempo de retención de 30 minutos, 5 Amp y 600 cm², logrando un 97,94 % de eliminación en turbidez y un 88,67 % en DQO” (Bustos Murillo, Pulido Aponte y Rivera Escobar, 2023).
- **AOPs:** Estas tecnologías son capaces de degradar compuestos orgánicos recalcitrantes que no se eliminan fácilmente por métodos convencionales. No obstante, como señala la CEPAL, “la aplicación de tecnologías de oxidación avanzada en aguas residuales industriales todavía está condicionada por su complejidad técnica y costes energéticos elevados” (Espinosa Armendáriz et al., 2024).
- **Membranas:** En investigaciones realizadas por la Universidad Nacional de Colombia, se observó que “el tratamiento con la membrana de nanofiltración NF90SR permitió obtener resultados de remoción de color superiores al 97 %” (Gil-Pavas, 1999).
- **Centrifugación:** En la industria curtiente se probó un sistema de centrifugación con tela filtrante que buscaba reducir tiempos de tratamiento, minimizar costos y generar beneficios ambientales (Bustos Murillo, Pulido Aponte y Rivera Escobar, 2023^a).

Tabla 7. "Comparación de eficiencia técnica de tecnologías emergentes".

Tecnología	Tipo de contaminantes tratados	Eficiencia remoción	Fuente
Electrocoagulación	Metales, sólidos suspendidos, colorantes	Hasta 97,94 % (turbidez)	Universidad Distrital (2022)
AOPs	Fenoles, pesticidas, compuestos recalcitrantes	>90 %	CEPAL (2022)
Membranas	Sales, colorantes, microorganismos	>97 % (color)	SciELO (2006)
Centrifugación	Sólidos densos, lodos industriales	Alta (reducción de volumen)	Revista Vínculos (2023)

Nota. Tomado de Hong, X., Han, Z., Xing, J., Xiao, N., Ding, Y., Wei, G., Wang, X., & Zhang, H. (2025). Recent advances in membrane and integrated processes for the removal of nanoplastics from water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.

En complemento a estos hallazgos, el análisis integral de las fuentes bibliográficas consultadas evidencia que las tecnologías híbridas e integradas están consolidándose como alternativas altamente efectivas frente a los retos actuales del tratamiento de aguas residuales. Los procesos combinados de electrocoagulación y electro oxidación, por ejemplo, alcanzan eficiencias superiores al 98 % en la remoción de DQO, color y sólidos suspendidos, incluso en efluentes de alta carga contaminante como los generados en la industria del curtido o el recubrimiento electroforético. De igual forma, los sistemas bioelectroquímicos muestran una prometedora capacidad para la degradación de materia orgánica y recuperación simultánea de energía, con tasas de remoción cercanas al 90 % bajo condiciones controladas.

Asimismo, las tecnologías basadas en adsorción magnética y desionización capacitiva han demostrado un rendimiento notable en la eliminación de iones metálicos y sales, alcanzando remociones de hasta 97 %, mientras que las membranas integradas (nanofiltración y ultrafiltración) mantienen eficiencias por encima del 95 % en la separación de microplásticos, colorantes y sólidos coloidales. Estos resultados, sustentados en estudios de alto impacto (ScienceDirect, Elsevier, Scopus y DOAJ), confirman que la integración de procesos físico-químicos y electroquímicos no solo optimiza la depuración del agua, sino que también mejora la sostenibilidad y viabilidad económica de los sistemas de tratamiento a escala industrial y municipal.

En el contexto colombiano, donde las aguas residuales industriales y municipales presentan una alta variabilidad en su composición (particularmente en concentraciones de materia orgánica, metales pesados y colorante), la tecnología con mayor potencial de aplicación es la electrocoagulación integrada con procesos de oxidación avanzada (AOPs). Esta combinación permite alcanzar altos porcentajes de remoción (superiores al 95 % en DQO, color y turbidez) con costos operativos moderados, adaptación a distintas escalas y bajo requerimiento de espacio, condiciones clave para su implementación en pequeñas y medianas plantas de tratamiento (PTAR). Además, Colombia cuenta con disponibilidad de materiales conductores (como electrodos de hierro o aluminio) y fuentes energéticas relativamente accesibles, lo que favorece su desarrollo local. Integrar estos sistemas con etapas complementarias de separación física, como centrifugación o filtración por membranas, ofrece una solución tecnológicamente robusta y sostenible, capaz de responder a las exigencias regulatorias nacionales (Resolución 0631 de 2015 y Decreto 1076 de 2015) y a los retos de gestión ambiental en sectores productivos estratégicos del país.

3.6.2. Viabilidad técnica en la industria colombiana

La viabilidad técnica hace referencia a qué tan factible es incorporar estas tecnologías en las condiciones reales de operación de la industria en Colombia, este análisis se basa en cuatro factores principales: compatibilidad con la infraestructura existente, disponibilidad de personal técnico, escalabilidad del sistema y facilidad de manejo.

Resultados:

- **Electrocoagulación:** Ya ha sido aplicada con éxito en sectores como curtiembres, textiles y metalmecánica, tal y como lo menciona la Revista Mutis (2020), “es una alternativa viable como tratamiento no convencional para aguas residuales industriales de curtiembre”.
- **AOPs:** Aunque ofrecen un alto rendimiento, esta requiere de un control técnico estricto y su implementación todavía es bastante limitada en el país debido a su elevado costo energético y a su escasa disponibilidad de equipos.
- **Membranas:** Son muy efectivas, pero conllevan costos operativos importantes y requieren mantenimiento especializado. Un desafío técnico frecuente es el ensuciamiento de las membranas, lo cual implica impactos económicos considerables.
- **Centrifugación:** Ya se encuentra implementada en sectores como la agroindustria y la industria papelera, esta se caracteriza por su manejo sencillo, su mantenimiento moderado y los costos más asequibles en comparación con tecnologías más complejas.

3.6.3. Limitaciones técnicas actuales

Pese a su gran potencial, estas tecnologías enfrentan algunas barreras que actualmente dificultan su adopción a mayor escala:

- **Electrocoagulación:** Es bastante eficiente, pero genera lodos secundarios que deben tratarse y disponerse adecuadamente, lo cual implica requerimientos adicionales de espacio y manejo.
- **AOPs:** El principal obstáculo es el alto consumo energético y la necesidad de reactivos específicos, lo que eleva sus costos.
- **Membranas:** La inversión inicial es alta, y estas requieren de un monitoreo continuo, además de esto, también son propensas a que se ensucien, lo que reduce su vida útil si no se gestionan correctamente esto.
- **Centrifugación:** Es efectiva para la remoción de sólidos, su capacidad se reduce cuando se trata de contaminantes solubles o emulsiones finas.

Las tecnologías emergentes analizadas muestran resultados que son prometedores en términos de eficiencia en la remoción de contaminantes, así como una viabilidad técnica razonable para su incorporación en los procesos industriales del país. No obstante, su adopción requiere de una estrategia bien estructurada que incluya acompañamiento técnico, formación especializada y un entorno favorable para la inversión. De aplicarse correctamente, estas tecnologías pueden ser clave para avanzar en el cumplimiento de las normas ambientales, mejorar la calidad del recurso hídrico.

3.7. Evaluación comparativa de costos e implementación

La incorporación de tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia requiere de un análisis integral que considere no solo su rendimiento técnico sino también los costos vinculados a su instalación, operación y mantenimiento, a continuación, se presenta una evaluación comparativa de estas tecnologías en función de su viabilidad económica, escalabilidad y el retorno de inversión, con base en experiencias documentadas y estudios recientes.

3.7.1. Costos estimados de inversión y operación

Los costos asociados a la implementación de las tecnologías emergentes varían según la naturaleza del proceso, la escala de implementación y las condiciones particulares de cada industria. A modo de referencia general:

- **Electrocoagulación:** Se caracteriza por un costo de inversión moderado y gastos operacionales bajos, de acuerdo con García et al. (2018), la instalación de una planta puede requerir entre USD 50.000 y 200.000, dependiendo de su capacidad y especificaciones técnicas, su costo operativo promedio se sitúa en torno a los USD 0,2 por metro cúbico tratado.
- **Procesos de oxidación avanzada (AOPs):** Requieren inversiones más altas, y esto se debe al uso intensivo de reactivos y equipos especializados, como lo indica Rodríguez et al. (2019) estiman una inversión superior a USD 300.000, con costos de operación cercanos a USD 0,5 por metro cúbico.
- **Sistemas de membranas:** Tecnologías como la nanofiltración y la ósmosis inversa presentan una inversión inicial considerable, entre USD 100.000 y 500.000, según López et al. (2020), y un costo operativo estimado de USD 0,3 por metro cúbico tratado.
- **Centrifugación:** Ofrece una alternativa de bajo costo tanto en inversión (entre USD 30.000 y 150.000) como en operación (USD 0,1 por metro cúbico), según Martínez et al. (2017), lo que la convierte en una opción viable para procesos donde la separación física es crítica.

3.7.2. Comparación con métodos tradicionales

En comparación con tecnologías convencionales, las emergentes presentan ventajas en cuanto a eficiencia y a calidad del efluente, aunque implican mayores inversiones iniciales, métodos tradicionales como las lagunas de estabilización o tratamientos biológicos tienen unos menores costos de instalación, pero estos presentan

limitaciones frente a contaminantes específicos y requieren mayor disponibilidad de terreno, Pérez et al. (2016) reportan costos operativos entre USD 0,2 y 0,4 por metro cúbico para estos sistemas, una cifra que, aunque competitiva, no siempre se traduce en resultados eficientes frente a contaminantes complejos.

3.7.3. Estabilidad y retorno de inversión

La adaptabilidad de estas tecnologías a diferentes escalas de operación es determinante para su implementación, la electrocoagulación y la centrifugación presentan una alta escalabilidad y flexibilidad operativa, lo que facilita su adopción en distintos sectores, en cambio, los AOPs y los sistemas de membranas, son bastante eficaces, pero requieren de una planificación más rigurosa en cuanto a términos de diseño y ampliación.

Desde el punto de vista financiero, estas tecnologías emergentes muestran retornos de inversión favorables cuando se consideran los beneficios indirectos asociados, como el cumplimiento normativo, la posibilidad de reutilización del agua tratada y la mejora en la imagen corporativa. Ramírez et al. (2021) estiman que el retorno de inversión puede lograrse en un plazo de 3 a 5 años, dependiendo del tipo de industria y del volumen de tratamiento requerido.

Tabla 8. "Comparación de costos y viabilidad de tecnologías emergentes".

Tecnología	Costo inversión (usd)	Costo operacional (usd/m³)	Retorno inversión (años)
Electrocoagulación	50.000 – 200.000	0,2	3 – 4
AOPs	> 300.000	0,5	4 – 6
Sistemas de membranas	100.000 – 500.000	0,3	4 – 5
Centrifugación	30.000 – 150.000	0,1	2 – 3

Nota. Elaboración propia, con base en García. (2018); Rodríguez. (2019); López. (2020); Martínez. (2017); Ramírez. (2021).

La elección de una tecnología emergente para el tratamiento de aguas residuales industriales debe de considerar la eficiencia técnica y también debe de tener en cuenta la viabilidad económica, la capacidad de adaptación a distintas escalas y el periodo de retorno de la inversión, tecnologías como la electrocoagulación y la centrifugación se perfilan como alternativas accesibles y adaptables, especialmente para empresas con restricciones presupuestarias, en cambio, los AOPs y los sistemas de membranas ofrecen mayores niveles de eficiencia, pero requieren una mayor inversión inicial y una planificación más rigurosa para su implementación exitosa.

3.8. Cumplimiento normativo de las tecnologías emergentes

La adopción de tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia debe de articularse con la normativa ambiental vigente, siendo la Resolución 0631 de 2015 uno de los instrumentos normativos principales, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, esta resolución define los valores máximos permisibles de vertimiento a cuerpos de agua superficiales y redes de alcantarillado público, diferenciando los requisitos según el tipo de actividad económica, entre los parámetros regulados se destaca la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), también la demanda química de oxígeno (DQO), los sólidos suspendidos totales (SST), el pH, los aceites y grasas, y los coliformes fecales. Estos lineamientos tienen como propósito preservar la calidad de los recursos hídricos y mitigar los impactos asociados a las descargas industriales.

Teniendo esto en cuenta, cualquier tecnología que se proponga para su implementación debe de demostrar su eficiencia técnica y además de esto también su capacidad de cumplir de forma sostenida con los estándares definidos por la normativa, bajo condiciones reales de operación, las tecnologías emergentes como la electrocoagulación, los procesos de oxidación avanzada (AOPs), los sistemas de membranas y la centrifugación han comenzado a posicionarse favorablemente en este sentido, en la medida en que pueden integrarse a procesos industriales y garantizar la calidad del efluente tratado.

3.8.1. Parámetros exigidos en la resolución 0631 de 2015

La Resolución 0631 de 2015, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, constituye el principal referente normativo para el control de vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de agua superficiales y sistemas de alcantarillado público, el propósito principal de esta resolución es garantizar que las descargas industriales no comprometan la calidad del recurso hídrico ni representen riesgos para la salud humana y los ecosistemas acuáticos.

La normativa establece parámetros obligatorios que deben de ser monitoreados por todas las industrias que generan aguas residuales no domésticas, definiendo umbrales máximos permisibles para cada uno. Las tecnologías de tratamiento adoptadas deben ser capaces de alcanzar estos valores, lo cual debe acreditarse mediante evidencias técnicas verificables.

Los principales parámetros regulados incluyen:

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅):** Límite máximo: 200 mg/L. Refleja la carga orgánica biodegradable presente en el agua, asociada al consumo de oxígeno por actividad microbiana.
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Límite: 400 mg/L. Mide la cantidad total de materia orgánica e inorgánica susceptible de oxidación.
- **Sólidos Suspendidos Totales (SST):** Valor límite: 100 mg/L. Representa la concentración de partículas sólidas no disueltas, que afectan la turbidez y sedimentación.
- **Aceites y Grasas:** Máximo permitido: 30 mg/L. Pueden generar capas superficiales que dificultan el intercambio gaseoso y afectan la vida acuática.
- **pH:** Rango admisible: entre 6,0 y 9,0. Valores fuera de este intervalo pueden alterar la solubilidad de contaminantes y la eficacia de los tratamientos.
- **Coliformes fecales:** Límite: 1.000 NMP/100 mL (según tipo de vertimiento). Indicador de contaminación microbiológica con implicancias sanitarias.

Estos límites actúan como referencias técnicas mínimas que deben ser cumplidas por cualquier sistema de tratamiento, lo cual exige que las tecnologías emergentes se validen no solo en laboratorio, sino también en condiciones reales de operación.

3.8.2. Casos de cumplimiento exitosos en Colombia y Latinoamérica

La efectividad normativa de las tecnologías emergentes se ha evidenciado en diversos estudios aplicados en Colombia y otros países latinoamericanos, donde estas soluciones han logrado resultados que se ajustan a los límites que están establecidos por la Resolución 0631 de 2015. A continuación, se presentan los hallazgos más relevantes que fueron encontrados:

- **Electrocoagulación:** Se ha documentado su alta eficiencia en la remoción de turbidez y DQO en efluentes industriales. Rodríguez et al. (2021) reportan una remoción del 97,94 % en turbidez y del 88,67 % en DQO, valores que se ubican por debajo de los límites normativos colombianos.
- **Procesos de oxidación avanzada (AOPs):** presenta una elevada eficiencia en la degradación de compuestos recalcitrantes, la adopción masiva en Colombia se ve limitada por su complejidad técnica y el alto consumo energético. Fernández-Alba et al. (2022) advierten que su implementación requiere condiciones controladas y mayores recursos.

- **Sistemas de membranas (nanofiltración y osmosis inversa):** estas dos tecnologías han demostrado que son eficientes para producir efluentes de alta calidad, un estudio de López al. (2020) indica que la nanofiltración logró una remoción de color superior al 97 % y redujo la DQO a menos de 300 mg/L, cumpliendo con los parámetros normativos exigidos.
- **Centrifugación:** Es mayormente utilizada en sectores como el curtido de pieles, esta tecnología ha mostrado resultados satisfactorios en la separación de sólidos y la reducción de carga contaminante, con beneficios operacionales y ambientales. Martínez et al. (2017) destacan su aplicabilidad práctica y sus bajos costos operativos.

Normativa comparativa:

- Electrocoagulación, membranas y centrifugación, estas 3 tecnologías han cumplido con los estándares exigidos por la Resolución 0631 en estudios aplicados.
- Los AOPs presentan un alto potencial de depuración, aunque su implementación requiere un mayor respaldo técnico y financiero.
- En cuanto a términos de eficiencia regulatoria, todas estas tecnologías superan los métodos tradicionales, en especial en parámetros como DBO, DQO y SST.

En conclusión, se muestra la evidencia disponible, que confirma que las tecnologías emergentes analizadas constituyen una alternativa técnica y legalmente viable para el cumplimiento de la normativa colombiana en materia de los vertimientos.

3.9. Estrategias para la adopción en el sector industrial colombiano

La implementación de tecnologías emergentes en el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia va más allá de su efectividad técnica o del cumplimiento normativo, su inclusión demanda que las condiciones de las instituciones financieras y operativas que favorezcan su adopción en distintos sectores, aunque se han identificado métodos que prometen éxito, como la electrocoagulación, los sistemas de membranas, los procesos de oxidación avanzada o la centrifugación, su despliegue a escala industrial sigue siendo limitado.

Es por ello que a continuación se plantean estrategias para superar las principales barreras que han sido detectadas y así lograr facilitar la adopción progresiva de estas tecnologías.

3.9.1 Superación de barreras técnicas y económicas

Uno de los principales desafíos está en las limitaciones que enfrentan muchas empresas, en especial las PYMEs, en infraestructura, financiamiento y capacidad técnica para incorporar tecnologías avanzadas, estas condiciones hacen más difícil el acceso a soluciones que requieren inversiones iniciales altas y personal que este calificado.

Entre las estrategias sugeridas se encuentra la creación de programas de cofinanciación público, privada, similares a los impulsados por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, que faciliten la modernización de plantas, de igual manera, se propone incentivar líneas de crédito verde, a su vez, la adopción de soluciones modulares y móviles pueden representar una vía viable para empresas con una menor escala operativa, como lo indica Martínez. (2017), "los sistemas de tratamiento por centrifugación, al ser compactos y de fácil operación, representan una opción viable para empresas con restricciones de espacio y capital".

3.9.2. Fortalecimiento de capacidades técnicas y gestión del conocimiento

La incorporación de tecnología requiere también de una base humana que este capacitada para operarla, mantenerla y optimizarla, la carencia de personal técnico especializado representa una limitante seria para la implementación de estas tecnologías.

Teniendo esto en cuenta, se plantea fomentar convenios entre universidades, centros de formación técnica e industria para preparar operadores que estén especializados en tecnologías de tratamiento, además, de la creación de centros regionales de transferencia tecnológica puede facilitar la capacitación y validación de soluciones, también se recomienda apoyar iniciativas de formación como diplomados, seminarios o publicaciones técnicas que promuevan el conocimiento aplicado. Rodríguez Fernández-Alba. (2012) destacan que “la divulgación de experiencias exitosas y la formación especializada son clave para que las tecnologías emergentes dejen de ser opciones marginales y se conviertan en soluciones sistemáticas para la industria”.

3.9.3. Alineación con la normatividad y estímulos regulatorios

El marco normativo ambiental colombiano, a través de herramientas como lo son las resoluciones 0631 de 2015 y 1256 de 2021, las cuales establece parámetros que pueden convertirse en catalizadores de cambio si se acompañan de incentivos y mecanismos eficientes de implementación.

Se recomienda, entre otras medidas, incorporar cláusulas de estímulo en licencias ambientales para empresas que adopten tecnologías certificadas, otorgar deducciones tributarias por inversiones en sistemas de tratamiento ambiental, conforme a como lo indica el Artículo 158-2 del estatuto tributario, y aumentar la frecuencia de monitoreo con integración a plataformas digitales para lograr agilizar la trazabilidad, según y como lo indica el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (2015), “las tecnologías que aseguren el cumplimiento sostenido de los parámetros establecidos en la Resolución 0631 pueden ser consideradas como estrategias prioritarias en la planificación ambiental sectorial”.

3.9.4. Segmentación estratégica por tipo de industria

El éxito en la adopción requiere de estrategias diferenciadas según las características del efluente y las condiciones operativas del sector, no todas las tecnologías emergentes se adaptan igual a todos los rubros productivos.

En el caso de la industria textil o curtidora, la electrocoagulación y la centrifugación son especialmente efectivas frente a contaminantes como colorantes o sólidos suspendidos. Para sectores como el farmacéutico y químico, los procesos de oxidación avanzada y los sistemas de membranas permiten eliminar compuestos recalcitrantes. En la agroindustria, la integración de soluciones híbridas que combinen bioelectroquímica con separación física resulta clave para el reúso del agua y la reducción de carga orgánica. Como plantean Bustos Murillo, Pulido Aponte y Rivera Escobar (2023), “la adopción tecnológica debe considerar las características específicas del efluente y la capacidad de gestión de cada industria para ser efectiva” (p. 135).

Para lograr avanzar hacia una transformación estructural del tratamiento de aguas industriales en Colombia se exige una estrategia que combine financiamiento, capacitación, regulación e inteligencia sectorial, solo mediante un enfoque integral y sostenido será posible lograr cerrar la brecha entre la disponibilidad tecnológica y su aplicación real en el territorio.

3.10. Análisis comparativo de tecnologías emergentes seleccionadas

El presente cuadro comparativo (tabla 10) se elabora con el fin de evaluar la viabilidad de las diferentes técnicas de tratamiento de aguas residuales dentro del contexto colombiano, considerando factores clave como la eficiencia de remoción de contaminantes, la viabilidad económica, la aplicabilidad en distintos sectores productivos y la adecuación al cumplimiento de la normativa ambiental vigente, particularmente la Resolución 0631 de 2015. Esta valoración permite establecer una visión objetiva de cuáles tecnologías pueden ser más efectivas y factibles de implementar a nivel nacional, priorizando aquellas que representen un equilibrio óptimo entre rendimiento técnico, sostenibilidad económica y compatibilidad regulatoria. Los lineamientos calificativos de evaluación se encuentran descritos y explicados en la tabla 9, presentada a continuación.

La calificación del cuadro comparativo se realizó mediante un análisis cualitativo apoyado en datos técnicos, estudios previos y experiencias documentadas sobre la implementación de cada tecnología en contextos similares al colombiano. Se evaluaron cuatro criterios clave: eficiencia de remoción, entendida como la capacidad de la técnica para reducir contaminantes presentes en el agua residual; viabilidad económica, que analiza los costos de

instalación, operación y mantenimiento; aplicabilidad, relacionada con la adaptabilidad de la tecnología a diferentes escalas y tipos de vertimientos; y adecuación normativa, que valora el grado en que la técnica facilita el cumplimiento de los parámetros exigidos por la normatividad ambiental colombiana. Para cada criterio, se asignó una puntuación en una escala del 1 al 5, donde 1 representa un desempeño deficiente y 5 un desempeño idealmente satisfactorio. La calificación final de cada tecnología es el resultado de la valoración individual por criterio, permitiendo identificar fortalezas, limitaciones y potencial de implementación.

Tabla 9. Lineamientos calificativos para la comparación de viabilidad de *diferentes tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales dentro del contexto técnico colombiano*

Escala de valoración	Criterio evaluación	Explicación
1	Deficiente	No adecuada para la utilización en el territorio
2	Bajo	No cumplen con criterios específicos de la necesidad del territorio
3	Aceptable	Cumple con algunos criterios, pero tiene falencias en la adaptabilidad del contexto deseado
4	Satisfactorio	Cumple con los criterios
5	Idóneamente satisfactorio	Cumple con todos los criterios y es adaptativamente ideal para el contexto del territorio

Nota. Elaboración propia

Interpretación

- Electrocoagulación: Alta eficiencia para metales pesados, colorantes y compuestos difíciles, pero su costo operativo por consumo energético la ubica en un rango medio de viabilidad económica. Buena adaptación al cumplimiento normativo colombiano, sobre todo en sectores industriales con vertimientos metálicos.
- Sistemas de membranas: Muy alta calidad del efluente, cumpliendo normativas estrictas, pero con inversión inicial alta y sensibilidad a incrustaciones (lo que requiere pretratamiento). Menos aplicables en zonas rurales por mantenimiento especializado.
- Centrifugación + Nanofiltración / Ósmosis inversa: Excelente eficiencia y cumplimiento normativo, ideales para reutilización de agua. Sin embargo, su viabilidad económica es baja debido a altos costos de operación y energía, y su aplicación masiva en Colombia sería más factible en industrias grandes y zonas urbanas.
- AOPs (Procesos de oxidación avanzada): Destacan por su capacidad para degradar contaminantes persistentes y emergentes. Aunque su costo no es tan bajo, la relación beneficio-normativa es alta, lo que las hace muy atractivas para industrias con vertimientos complejos que deben cumplir con límites estrictos de la Resolución 0631 de 2015.

Tabla 10. Comparación técnica de viabilidad para *diferentes tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales dentro del contexto técnico colombiano*

Tecnología	Eficiencia de remoción	Viabilidad económica	Aplicabilidad	Adecuación a cumplimiento de normativa	Promedio de viabilidad
Electrocoagulación	4	3	4	4	3.75
AOPs	5	3	4	5	4.25
Sistemas de membranas	4	2	3	5	3.50
Centrifugación	5	2	3	5	3.75

Nota. Elaboración propia

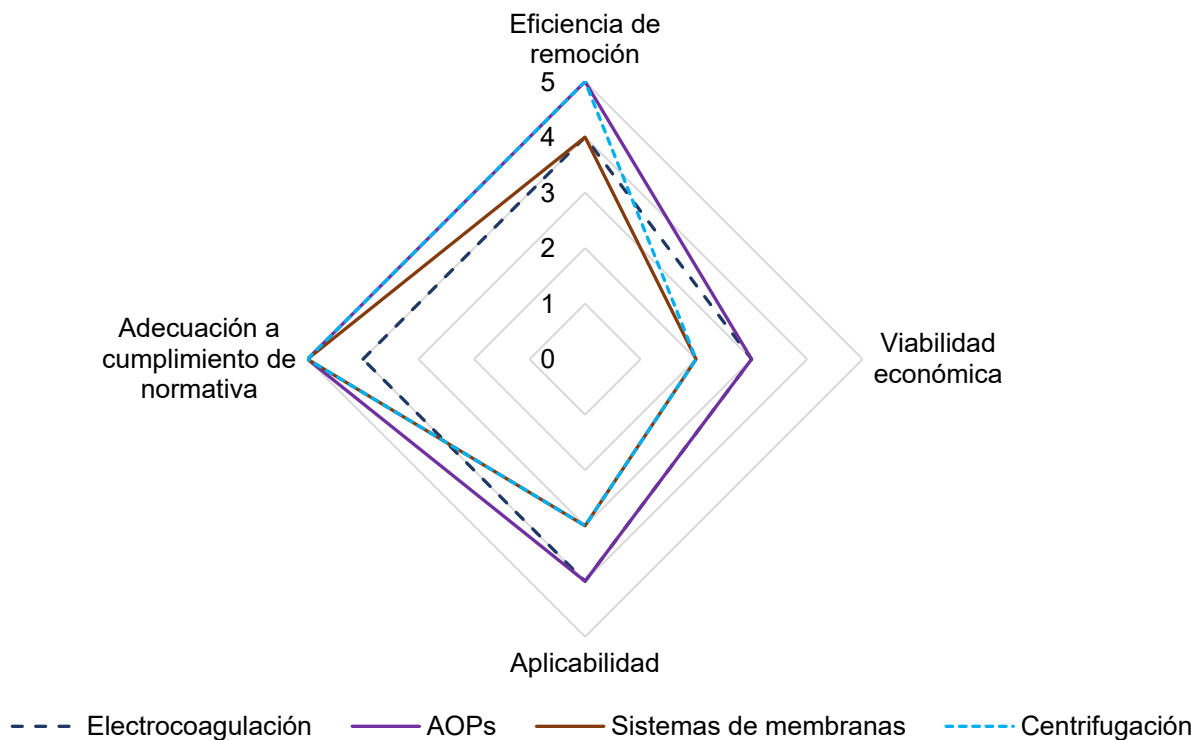
Del análisis se desprende que los Procesos de Oxidación Avanzada (AOPs) presentan el mayor potencial para el contexto colombiano, ya que combinan una alta eficiencia de remoción, capacidad para eliminar contaminantes

emergentes y un excelente cumplimiento normativo, aunque con un costo de operación medio. Las tecnologías de membranas y ósmosis inversa logran resultados sobresalientes en calidad de efluente, pero sus altos costos y requisitos de mantenimiento las limitan a industrias de gran capacidad económica y zonas con infraestructura técnica adecuada. La electrocoagulación, por su parte, ofrece un balance interesante entre eficiencia y costo, especialmente útil para vertimientos con metales pesados y compuestos difíciles de tratar. En conjunto, esta evaluación no solo identifica las tecnologías más idóneas para el país, sino que también orienta estrategias de priorización e inversión en el sector, fomentando la implementación progresiva de soluciones de alta eficiencia que permitan avanzar hacia un uso más sostenible y seguro del recurso hídrico. Una forma más gráfica para observar la comparación realizada se analiza mediante el uso de gráfica tipo radar que permite interpolar los diferentes criterios evaluados versus las tecnologías presentadas en este estudio lo cual se denota en la ilustración 10. Presentada a continuación.

La gráfica tipo radar permite visualizar de manera comparativa el desempeño de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales según los cuatro criterios evaluados. En el gráfico, cada eje representa un criterio —eficiencia de remoción, viabilidad económica, aplicabilidad y adecuación normativa— y la extensión de cada línea hacia el borde indica una mejor calificación.

El análisis muestra que los procesos de oxidación avanzada (AOPs) destacan en eficiencia de remoción y cumplimiento normativo, alcanzando valores cercanos a la calificación máxima, lo que los posiciona como una opción altamente efectiva en el tratamiento de contaminantes complejos. Sin embargo, su viabilidad económica es moderada debido a los altos costos operativos y de implementación. La electrocoagulación presenta un balance adecuado, con buenas calificaciones en eficiencia y aplicabilidad, pero con un costo económico algo más elevado que otras opciones. Los sistemas de membranas muestran gran efectividad y cumplimiento normativo, aunque sus costos y requerimientos técnicos limitan su implementación masiva. Por último, la centrifugación (nanofiltración y ósmosis inversa) tiene un alto rendimiento en calidad final del agua, pero su aplicabilidad a gran escala y sus altos costos reducen su viabilidad en muchas regiones del país

Ilustración 10. Análisis Comparativo de la viabilidad de diferentes tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales dentro del contexto técnico colombiano



Nota. Elaboración propia

En síntesis, la gráfica refleja que, aunque no existe una tecnología que sobresalga en todos los criterios simultáneamente, la selección óptima dependerá del balance entre eficiencia técnica, costos, condiciones locales y exigencias normativas, siendo recomendable evaluar combinaciones tecnológicas para optimizar resultados.

4. CONCLUSIONES

El estudio exhaustivo de tecnologías emergentes para el tratamiento de aguas residuales industriales en Colombia ha permitido identificar un conjunto de alternativas con alto potencial tanto en términos de eficiencia técnica como en términos de viabilidad operativa y alineación con los requisitos normativos vigentes, a lo largo de este capítulo se analizaron criterios fundamentales como lo son el principio de funcionamiento, las condiciones técnicas necesarias para su implementación, los costos relativos, el nivel de madurez tecnológica (TRL) y su grado de adopción dentro del país.

Entre las tecnologías evaluadas en este capítulo, se destacaron la electrocoagulación y la centrifugación por su alto nivel de madurez ($TRL \geq 8$) y su uso probado en sectores como el textil, curtidora y alimentario, donde han alcanzado eficiencias de remoción superiores al 85 % en parámetros como la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST) y turbidez (Mollah, 2001), los procesos de oxidación avanzada (AOPs), si bien presentan resultados comparables en la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes, enfrentan restricciones por sus altos requerimientos energéticos y la escasa disponibilidad de equipos en el mercado colombiano (Oturán & Aaron, 2014), en cuanto a los sistemas de membranas, se valoró su gran capacidad de purificación, en especial en los procesos orientados al reúso de agua, aunque su sensibilidad al ensuciamiento y la necesidad de mantenimiento especializado siguen siendo factores críticos a considerar (Hidalgo & Murcia, 2021).

Desde un punto de vista económico, si bien estas tecnologías implican una inversión inicial superior respecto a los métodos convencionales, su rentabilidad a mediano plazo se justifica por medio de ahorro hídrico, la disminución de sanciones regulatorias, el posicionamiento reputacional y la posibilidad de ingresar a mercados con exigencias ambientales que sean más duras, a nivel de normas, todas las tecnologías analizadas mostraron capacidad de cumplimiento con los estándares fijados por la Resolución 0631 de 2015, especialmente en cuanto a los límites de DBO5, DQO, SST y aceites y grasas.

Las opciones más destacadas son la electrocoagulación, por su eficiencia y versatilidad operativa, los sistemas de membranas, por la calidad del efluente que permiten obtener y la centrifugación, por su bajo consumo energético y costos operativos relativamente bajos.

5. AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, mi soporte y pilar fundamental. Ustedes son la base de todo lo que soy, el motor que me impulsó a seguir adelante y alcanzar esta meta. Sin su amor y respaldo, nada de esto habría sido posible. A mis amigos, que considero mi segunda familia, gracias por estar siempre ahí, brindando apoyo, alegría y fuerza en cada paso del camino. Su compañía ha sido un regalo invaluable. A todo el personal y la empresa Genfar DYM, gracias por brindarme los espacios y la flexibilidad necesaria para estudiar cómodamente, permitiéndome equilibrar el trabajo y mis sueños académicos. Y a Centroaguas S.A ESP, mi gratitud eterna por la experiencia y conocimientos que adquirí a lo largo de estos años de trabajo. Cada aprendizaje ha sido una pieza clave en mi formación y crecimiento personal. A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este logro. Este triunfo es tan mío como suyo.

6. DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Los autores declaran que no han usado herramientas de inteligencia artificial (IA) en la creación de este artículo

7. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASCUN. (2022). *Nueva técnica removería colorantes industriales en aguas residuales*. Asociación Colombiana de Universidades. Recuperado de <https://ascun.org.co/noticias-ies/nueva-tecnica-removeria-colorantes-industriales-en-aguas-residuales>
- Bazrafshan, E., Moein, H., Mostafapour, F. K., & Nakhaie, S. (2012). Application of electrocoagulation process for dairy wastewater treatment. *Journal of Chemistry*, 9(4), 2453–2461. <https://doi.org/10.1155/2012/523051>
- Borja, J. (2016). *PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales)*. En Servicios complementarios. CentroAguas S. A. E. S. P. Recuperado el 23 de julio de 2025, de <https://www.centroaguas.com/index.php/servicios/servicios-complementarios/sistema-de-succion-presion/12-servicios/servicios-complementarios/21-ptar>
- Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E., & Rivera Escobar, H. M. (2023a). Evaluación de un sistema de centrifugación para el secado de lodos generados en el tratamiento de aguas residuales en la curtiembre “El Escorpión” del municipio de Villapinzón, Cundinamarca. *Vínculos*. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/vinculos/article/view/15188>
- Bustos Murillo, F. A., Pulido Aponte, Á. E., & Rivera Escobar, H. M. (2023b). Tratamiento de aguas residuales en Colombia y sistemas bioelectroquímicos: usos y perspectivas. *Tecnura*, 27(76), 111–143. <https://doi.org/10.14483/22487638.19576>
- Colombia. Congreso de la República. (2009). *Ley 1333 de 2009*. Diario Oficial No. 47.368.
- Colombia. Ministerio de Agricultura & Ministerio de Salud. (1984). *Decreto 1594 de 1984*. Diario Oficial No. 36.800.
- Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Decreto 3930 de 2010*. Diario Oficial No. 47.937.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). *Resolución 0631 de 2015*. Diario Oficial No. 49.523.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Resolución 0883 de 2018*. Diario Oficial No. 50.695.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021a). *Resolución 0699 de 2021*. Diario Oficial No. 51.720.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021b). *Resolución 1256 de 2021*. Diario Oficial No. 51.908.
- Eaton, A. D., Clesceri, L. S., Rice, E. W., & Greenberg, A. E. (Eds.). (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24.^a ed.). APHA, AWWA & WEF.
- Espinosa Armendáriz, V., González Azuela, A. C., Juárez Belman, F. de J., Ponce Acosta, A. S., Saavedra Dávalos, C. G., Tapia Rodríguez, H., Ramos Ramírez, E., & Leticia, N. (2024). Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes del agua, una revisión. *JÓVENES EN LA CIENCIA*, 28, 1–11. <https://doi.org/10.15174/jc.2024.4584>
- Fernández-Alba, A., Martínez, R., & López, S. (2022). *Tratamientos terciarios en plantas de tratamiento de aguas residuales*. Editorial Agua Clara.
- Gil-Pavas, E. (1999). Remoción y recuperación de metales pesados de aguas residuales industriales. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, (18), 38–47. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.325814>
- Hong, X., Han, Z., Xing, J., Xiao, N., Ding, Y., Wei, G., Wang, X., & Zhang, H. (2025). Recent advances in membrane and integrated processes for the removal of nanoplastics from water and wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*.
- Instituto del Agua. (s. f.). *Sistemas de tratamiento de aguas residuales*. <https://www.institutodelagua.es>
- Izembart, H., & Le Boudec, B. (2003). *Waterscapes: El tratamiento de aguas residuales mediante sistemas vegetales*. Gustavo Gili.
- Khandegar, V., & Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of industrial effluent: A review. *Journal of Environmental Management*, 128, 949–963. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>
- López, A., Ramírez, D., & Torres, E. (2020). *Guía práctica sobre el tratamiento de aguas residuales industriales*. Ediciones Ecoingeniería.
- Market Research Future. (2025). *Global sludge treatment market forecast 2023–2030*. <https://www.marketresearchfuture.com>

- Martínez, F., Rodríguez, L., & Sánchez, P. (2017). *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*. Alfaomega.
- Metcalf & Eddy. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales* (4.ª ed.). McGraw-Hill.
- Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1–3), 199–210. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>
- Mollah, M. Y. A., Schennach, R., Parga, J. R., & Cocke, D. L. (2001). Electrocoagulation (EC): Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*, 84(1), 29–41. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)
- Moussa, D. T., El-Naas, M. H., Nasser, M., & Al-Marri, M. J. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186, 24–41. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.032>
- Morales Posada, N. B., & Acosta Niño, G. E. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 33–44. <https://doi.org/10.18359/rcin.282>
- Orozco-Lab. (2024). Elementos químicos que existen en aguas residuales de una ciudad. Recuperado de <https://www.orozolab.com.mx/blog/elementos-quimico-que-existen-en-aguas-residuales-de-una-ciudad>
- Oturan, M. A., & Aaron, J. J. (2014). Advanced oxidation processes in water/wastewater treatment: Principles and applications. A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577–2641.
- Pérez, J. C., Díaz, J. M., & Gómez, A. M. (s. f.). Efecto de una centrifugación complementaria en la recuperación de sólidos y mejora del tratamiento de agua de cola. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/6729/672971086013.pdf>
- ProColombia. (2023). *El sector de tratamiento de aguas residuales en Colombia: Retos y oportunidades*. <https://procolombia.co>
- Rodríguez Fernández-Alba, A., Letón García, P., Rosal García, R., Dorado Valiño, M., Villar Fernández, S., & Sanz García, J. M. (2012). Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales: Informe de vigilancia tecnológica [Informe técnico]. https://www.madrimasd.org/sites/default/files/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/VT/VT2_Tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf madri+d+1
- Rodríguez, J., Pérez, M., & Gómez, L. (2021). *Manual técnico de tratamiento de aguas residuales*. Ediciones Técnicas.
- Shamshad, J., & Rehman, R. U. (2024). Emerging bioelectrochemical technologies for wastewater remediation. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 22, 100814.
- Triviño-Pineda, J. S., & Sánchez-Ramírez, J. E. (2023). Evaluación de tecnologías de tratamiento en PTAR de pequeña escala. *Revista Ingeniería*, 28(1), 45–60.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (s. f.). *Centrifuge thickening and dewatering*. <https://www.epa.gov/biosolids/fact-sheet-centrifuge-thickening-and-dewatering>
- Venegas, C., Sánchez-Alfonso, A. C., Celis, C., Vesga, F.-J., & Méndez, M. G. (2021). Evaluación de métodos de espesamiento de lodos residuales. *Ingeniería y Universidad*, 25(2), 89–105.
- Vesilind, P. A. (2002). Centrifugation clarification and thickening. En *Solid-Liquid Separation* (pp. 145–170). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-59259-996-7_4
- Wang, J., Zhang, Y., Dai, Y., & Wang, H. (2022). Gravity settling and centrifugation increase the acid buffer capacity of sewage sludge. *Science of The Total Environment*, 806, 150679. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722003217>
- Water and Wastewater. (s. f.). Centrifuges in wastewater treatment: Enhancing efficiency and purity. *Water and Wastewater*. Recuperado de <https://www.waterandwastewater.com/centrifuges-in-wastewater-treatment-enhancing-efficiency-and-purity/>