



Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: Análisis bibliométrico de publicaciones científicas y revisión de resultados

Wastewater treatment by electrocoagulation: bibliometric analysis of scientific publications and review of results

Chuquimbalqui-Marina, Delmester^{1*}

Azabache-Aliaga, Yrwin Daniel²

Bardalez-Tuesta, Cinthya Melissa¹

Ordóñez-Ruiz, Karina Milagros³

¹Universidad Nacional de San Martín, Tarapoto, Perú

²Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú

³Universidad Nacional de Autónoma de Huanta, Huanta, Perú

Recibido: 23 Oct. 2024 | **Aceptado:** 13 Ene. 2025 | **Publicado:** 20 Ene. 2025

Autor de correspondencia*: d.chuquimbalqui@unsm.edu.pe

Como citar este artículo: Chuquimbalqui-Marina, D., Bardalez-Tuesta, C. M., Azabache-Aliaga, Y. D. & Ordóñez-Ruiz, K. M. (2025). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: Análisis bibliométrico de publicaciones científicas y revisión de resultados. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 4(1), e802. <https://doi.org/10.51252/reacae.v4i1.e802>

RESUMEN

Este artículo de revisión presenta un análisis bibliométrico de 3146 artículos científicos extraídos de la base de datos Scopus, utilizando las palabras clave "Wastewater Electrocoagulation". La selección abarcó publicaciones desde 1975 hasta 2024, distribuidas en 715 fuentes y con la colaboración de 7876 autores. Para llevar a cabo el análisis, se emplearon los programas VosViewer y Bibliometrics. En VosViewer, se utilizó un umbral mínimo de 12 ocurrencias por palabra clave, seleccionando 133 de las 4994 palabras clave registradas mediante el método de asociación normalizada. Estos 133 términos fueron organizados en 8 clústeres, cada uno analizado según los avances recientes en configuraciones de reactores de electrocoagulación, tipos de materiales de electrodos, y la eficiencia en la eliminación de contaminantes tanto en aguas residuales domésticas como industriales. El estudio se enfocó en analizar la evolución de las publicaciones sobre electrocoagulación y en destacar los avances recientes en la remoción de contaminantes utilizando esta tecnología. A través del análisis de los clústeres, se obtuvo una visión integral de las investigaciones actuales, lo que permitió identificar las áreas más innovadoras y emergentes de esta tecnología. Además, se evaluaron distintos métodos y materiales para mejorar la eficiencia del proceso.

Palabras clave: contaminantes; eficiencia; electrodos; electroquímica; remoción

ABSTRACT

This review article presents a bibliometric analysis of 3146 scientific articles extracted from the Scopus database, using the keywords "Wastewater Electrocoagulation". The selection covered publications from 1975 to 2024, distributed in 715 sources and with the collaboration of 7876 authors. The VosViewer and Bibliometrics programs were used to carry out the analysis. In VosViewer, a minimum threshold of 12 occurrences per keyword was used, selecting 133 of the 4994 keywords registered using the normalized association method. These 133 terms were organized into 8 clusters, each analyzed according to recent advances in electrocoagulation reactor configurations, types of electrode materials, and pollutant removal efficiency in both domestic and industrial wastewater. The study focused on analyzing the evolution of publications on electrocoagulation and highlighting recent advances in pollutant removal using this technology. Through cluster analysis, a comprehensive view of current research was obtained, which allowed the identification of the most innovative and emerging areas of this technology. In addition, different methods and materials were evaluated to improve the efficiency of the process.

Keywords: contaminants; efficiency; electrodes; electrochemistry; removal



1. INTRODUCCIÓN

La creciente crisis de disponibilidad de agua limpia se ha convertido en un desafío mundial significativo, impulsado por factores como el crecimiento poblacional, el cambio climático y la urbanización descontrolada. La contaminación del agua proveniente de fuentes domésticas, industriales y agrícolas agrega una capa de complejidad, ya que introduce compuestos químicos y contaminantes emergentes que las tecnologías convencionales de tratamiento no logran remover eficazmente (Moreno-Cabrera et al., 2021).

Para enfrentar esta problemática, se ha hecho énfasis en el desarrollo de tecnologías de tratamiento de agua que sean tanto sostenibles como altamente eficientes. Los procesos avanzados como la electrocoagulación, los biorreactores de membrana y la oxidación avanzada no solo mejoran la eficiencia de eliminación de contaminantes, sino que también pueden integrarse en sistemas energéticamente sostenibles (Liu et al., 2020; Kumar & Pal, 2019). Estas tecnologías permiten abordar de manera específica diferentes tipos de contaminantes, desde patógenos y sólidos suspendidos hasta microcontaminantes persistentes, proporcionando una alternativa viable frente a los métodos tradicionales (Gheraout et al., 2020).

Implementar soluciones de tratamiento sostenible es crucial para garantizar la disponibilidad de agua limpia en el futuro. La literatura sugiere que la combinación de tecnologías y su adaptación a contextos específicos puede maximizar su efectividad y sostenibilidad, permitiendo un uso eficiente de los recursos hídricos y energéticos a largo plazo (Gheraout et al., 2020; Li et al., 2021).

La electrocoagulación es un proceso electroquímico utilizado para el tratamiento de aguas residuales, mediante la eliminación de contaminantes por coagulación que consiste en la generación de coagulantes in situ mediante la aplicación de una corriente eléctrica a electrodos sumergidos en el agua (Asaithambi et al., 2024; Zaied et al., 2020; Shahedi et al., 2020; Mao et al., 2023). La electrocoagulación se ha convertido en una técnica innovadora y prometedora para el tratamiento de aguas residuales en diversos contextos domésticos, agrícolas e industriales (Rakhmania et al., 2022); (Moradi et al., 2021; Moussa et al., 2017).

En el contexto de la creciente demanda de soluciones efectivas para el tratamiento de aguas residuales, la optimización de la electrocoagulación con electrodos metálicos emerge como una técnica prometedora, especialmente para el tratamiento de aguas domésticas (Mollah et al., 2001). Se ha demostrado que la manipulación de parámetros clave, como la relación área-volumen y el tiempo de electrólisis, puede conducir a mejoras sustanciales en la eliminación de contaminantes, alcanzando eficiencias de hasta 93.2% y 94.1% respectivamente (Gao et al., 2021). Estos hallazgos subrayan la importancia de desarrollar soluciones de tratamiento personalizadas y costo-efectivas, adaptadas a las características específicas de diferentes fuentes de aguas grises (Tabash et al., 2024).

El tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación es una tecnología emergente que combina los principios electroquímicos y de coagulación (Shahedi et al., 2020). El análisis bibliométrico revela un aumento significativo en la investigación sobre este método, destacando su eficacia en la eliminación de contaminantes. Este enfoque proporciona una visión global del estado actual de la tecnología, identifica áreas emergentes y desafíos futuros, y ofrece una base sólida para investigadores y responsables de políticas ambientales interesados en avanzar en su desarrollo y aplicación.

Esta revisión sistemática de la bibliografía científica no solo refleja el creciente interés en este proceso de tratamiento de aguas residuales, sino que también destaca su versatilidad y potencial. Al proporcionar una visión comprensiva de las tendencias actuales, el estudio sirve como un recurso valioso para guiar futuras investigaciones y desarrollos en este campo prometedor de la gestión ambiental.

El objetivo de este artículo de revisión, aparte de identificar la evolución creciente en las publicaciones científicas, es analizar de manera exhaustiva los avances recientes en el tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación, destacando las innovaciones tecnológicas y metodológicas en este campo. A través de la revisión de estudios, se evalúan los parámetros más críticos que afectan la eficiencia del proceso, tales como el tipo de electrodos, la densidad de corriente y el pH, con el fin de identificar las condiciones óptimas de operación. Además, se busca establecer una base sólida de conocimientos que facilite el desarrollo de futuras aplicaciones y fomente el uso de la electrocoagulación como una tecnología sostenible y eficiente para el tratamiento de aguas residuales en distintos contextos industriales y domésticos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Análisis Bibliométrico

Se filtraron 3146 artículos científicos de la base de datos Scopus utilizando “Wastewater Electrocoagulation” como palabras clave, se escogieron estas palabras por ser las que engloban y generalizan la temática de la revisión, asegurando abarcar minuciosamente con la totalidad de los artículos originales publicados hasta la fecha en la base de datos. Los artículos seleccionados datan de 1975 a 2024, siendo el periodo de tiempo de inicio a fin de publicación de artículos con esta temática, esto de acuerdo con la filtración de las palabras claves; estos artículos pertenecen a 715 fuentes diferentes y 7876 autores. La búsqueda se realizó el 20 de junio del 2024.

Para la selección de los artículos científicos solamente se consideraron a los artículos originales y se descartaron a todos los demás manuscritos de la base de datos. El proceso de filtrado de estos artículos consistió en aplicar filtro al tipo de documento y a las palabras clave; no se aplicaron filtro a: años de publicación, nombre de autor, área temática, título de la fuente, etapa de publicación, afiliación, patrocinador de financiamiento, país, idioma y acceso. La finalidad principal de este procedimiento de selección, fue el de abarcar la totalidad de los artículos publicados a nivel mundial en esta base de datos, para realizar un análisis completo respecto al tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación.

Para el análisis bibliométrico se utilizaron los programas VosViewer y Bibliometrics. En VosViewer, se utilizaron 12 ocurrencias como número mínimo de una palabra clave, donde de 4994 palabras clave, 133 cumplían el umbral utilizando el método normalizado de asociación; estos se agruparon en 8 clusters para el análisis como se muestra en la Tabla 1. Fue necesario analizar los gráficos con las palabras claves en el idioma original de publicación, por esa razón el contenido de la Figura 1 y Figura 2 se encuentran en el idioma inglés.

Tabla 1.

Clusters por color y por número de elementos, obtenidos con el software VosViewer

Cluster	Color	Elementos	Palabras clave
1	Rojo	25	Electrocoagulación, Tratamiento de aguas residuales, Proceso electroquímico
2	Verde	25	Agua residual, coagulación, Remoción de metales pesados
3	Azul	16	Optimización, Electroodos de aluminio, Demanda química de oxígeno, análisis de costo.
4	Amarillo	16	Electrodos de hierro, aguas residuales industriales, eficiencia de remoción.

de colorantes, materia orgánica y tecnologías combinadas como electro-Fenton; el verde incluye la eliminación de metales pesados, arsénico y cromo, junto con mecanismos de remoción; el azul se enfoca en aguas residuales industriales como las textiles, optimización de procesos y metodologías; y el amarillo trata sobre materiales de electrodos como hierro y aluminio, diseño de reactores y estudios cinéticos. Otros colores reflejan temas más específicos como el reúso de agua, la eliminación de fósforo y microplásticos, así como aspectos relacionados con la eficiencia energética y los costos operativos. Este análisis evidencia las interconexiones y tendencias clave en la investigación, destacando enfoques innovadores y parámetros críticos en el contexto del tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación.

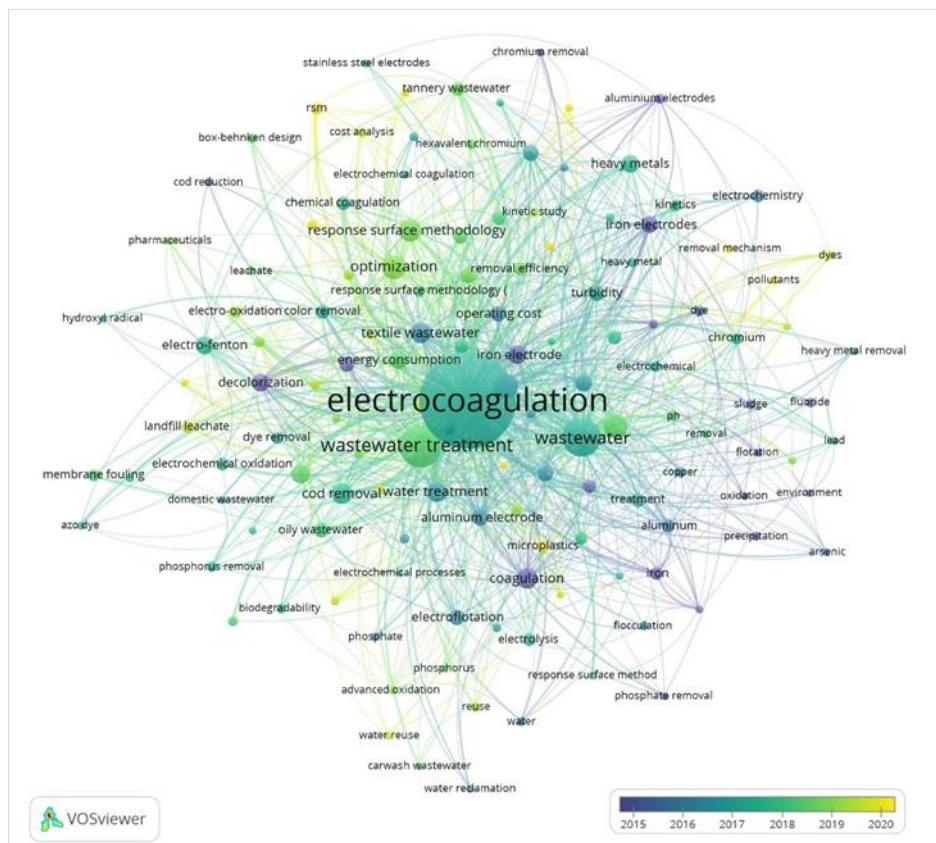


Figura 2. Mapa de clusters de palabras clave asociadas en función del tiempo (años), analizados con VosViewer mediante el método de asociación normalizado

La Figura 2 muestra el incremento en las investigaciones relacionadas al tratamiento de aguas residuales y a la aplicación de la electrocoagulación en los últimos años. La palabra clave principal "electrocoagulación" ocupa el centro de la figura, indicando su importancia central en el análisis. El color de los nodos varía según el año de aparición predominante de las palabras clave, como lo muestra la escala de colores que abarca de 2015 (azul oscuro) a 2020 (amarillo claro). Los clusters reflejan áreas temáticas específicas: los términos asociados con la optimización de procesos, como "metodología de superficie de respuesta" y "análisis de costos", aparecen en amarillo, indicando investigaciones recientes; mientras que temas como "electro-Fenton", "decoloración" y "remoción de fósforo" se asocian a períodos anteriores (colores azulados). Además, nodos como "metales pesados", "remoción de cromo" y "tratamiento de aguas residuales" resaltan en colores intermedios, mostrando su constante relevancia. La figura también destaca avances recientes en tecnologías como "microplásticos" y "oxidación avanzada", y aspectos relacionados con "consumo de energía" y "costos operativos", lo que resalta el interés actual en la sostenibilidad y eficiencia de los procesos de electrocoagulación. Este análisis temporal proporciona una visión integral de las tendencias y prioridades en la investigación del tema a lo largo del tiempo.

3.2. Análisis bibliométrico por publicaciones científicas

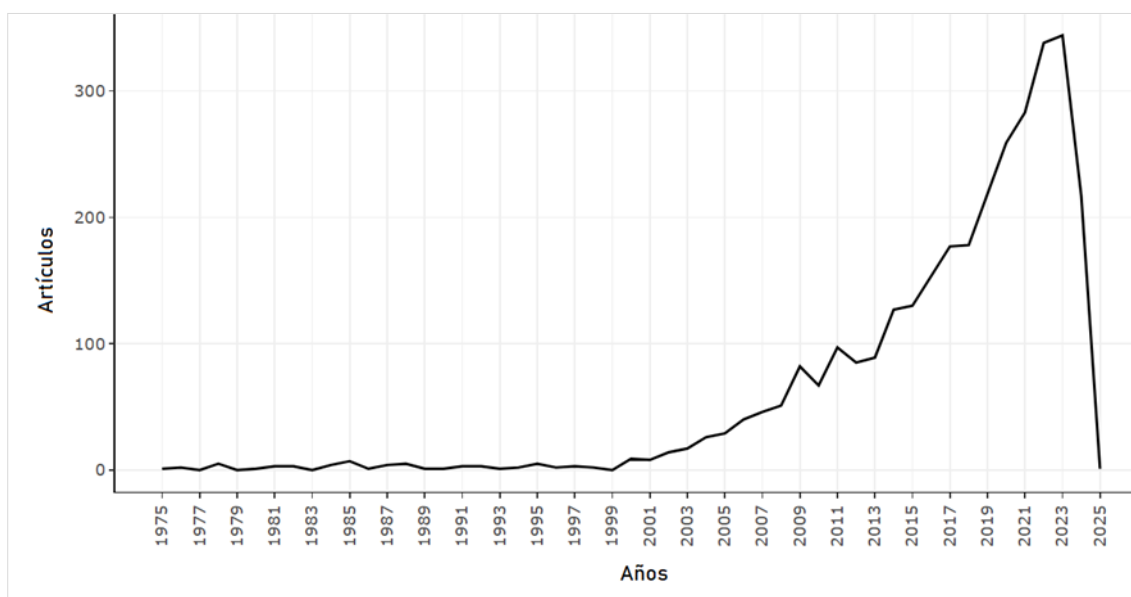


Figura 3. Producción y publicación científica anual de artículos científicos en la base de datos de Scopus, con temáticas de aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales entre los años 1975 y 2024

La Figura 3 muestra la evolución temporal de la producción científica relacionada con la electrocoagulación aplicada al tratamiento de aguas residuales, según artículos publicados en la base de datos Scopus entre 1975 y 2024. En las primeras décadas (1975-2000), la cantidad de publicaciones fue muy baja, con un crecimiento casi imperceptible. A partir de 2005, se observa un aumento gradual en la cantidad de artículos publicados, que se acelera significativamente después de 2015, marcando un auge en las investigaciones. Este crecimiento alcanza su pico máximo en 2021, con más de 300 artículos publicados en un solo año. Posteriormente, se evidencia una ligera disminución en la cantidad de publicaciones para los años 2023 y 2024. Este comportamiento refleja un creciente interés científico en la temática, impulsado probablemente por la necesidad de tecnologías más eficientes y sostenibles para el tratamiento de aguas residuales en las últimas dos décadas.

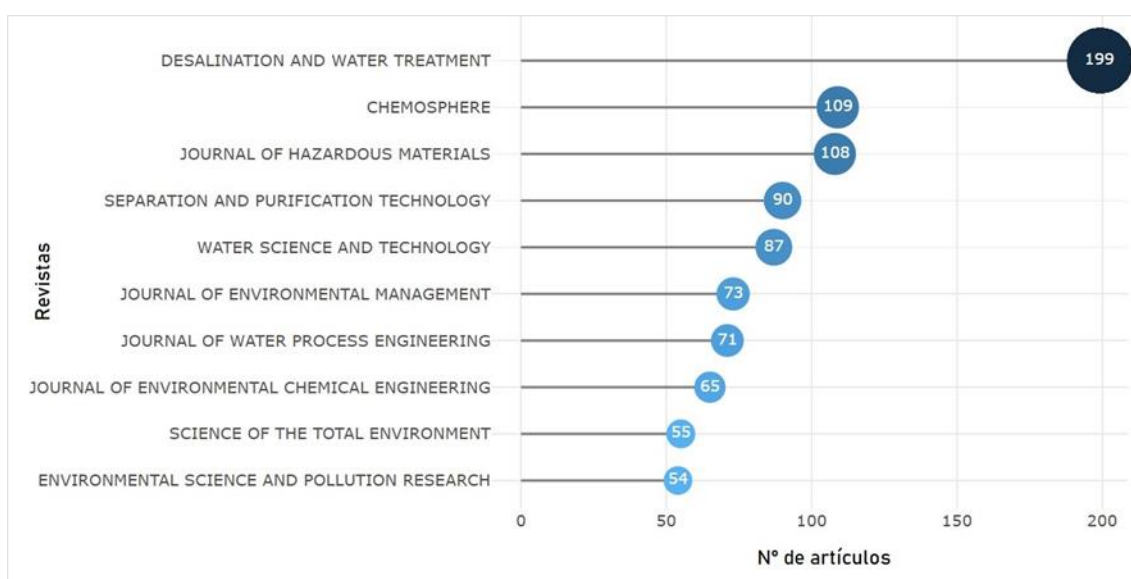


Figura 4. Revistas más relevantes en la base de datos de Scopus, con temáticas de aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales entre los años 1975 y 2024

La figura 4 destaca las revistas más influyentes en la base de datos Scopus relacionadas con la aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales entre 1975 y 2024. "Desalination and Water Treatment" encabeza la lista con 199 artículos, seguida por "Chemosphere" (109) y "Journal of Hazardous Materials" (108), reflejando su relevancia en la investigación de tecnologías innovadoras para la remediación ambiental. Otras revistas destacadas, como "Separation and Purification Technology" (90) y "Water Science and Technology" (87), se enfocan en procesos de purificación y separación de contaminantes, consolidando su importancia en la gestión de recursos hídricos.

El liderazgo de estas publicaciones evidencia la interdisciplinariedad de la electrocoagulación, abarcando aplicaciones industriales, agrícolas y urbanas para combatir la contaminación del agua. Además, la amplia diversidad de artículos publicados en estos medios muestra un interés creciente por desarrollar tecnologías más eficientes y sostenibles que respondan a los desafíos ambientales actuales, como el tratamiento de efluentes tóxicos y la recuperación de agua limpia.

Este análisis resalta cómo las revistas mencionadas desempeñan un papel crucial en la difusión de investigaciones relevantes, promoviendo el intercambio de conocimiento científico. Su impacto fomenta la implementación de soluciones innovadoras que buscan mitigar la crisis global del agua, consolidando la electrocoagulación como una alternativa prometedora en el ámbito del tratamiento de aguas residuales.

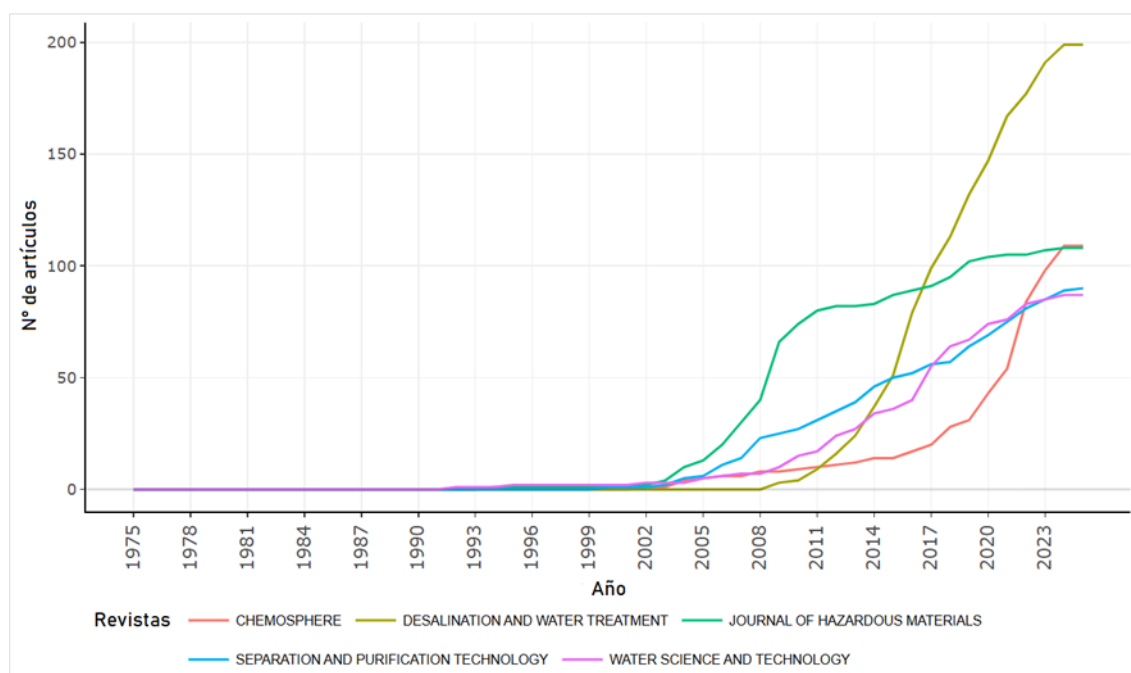


Figura 5. Revistas con mayores cantidades de artículos publicados a lo largo del tiempo en la base de datos de Scopus, con temáticas de aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales entre los años 1975 y 2024

La Figura 5 muestra la evolución temporal de la cantidad de artículos publicados en las revistas más relevantes en la base de datos Scopus sobre el uso de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales entre 1975 y 2024. Las publicaciones analizadas incluyen Chemosphere, Desalination and Water Treatment, Journal of Hazardous Materials, Separation and Purification Technology y Water Science and Technology.

Se observa que, hasta principios de los años 2000, la producción científica en este campo era limitada, con un crecimiento notable a partir del año 2010. Las revistas Desalination and Water Treatment y Chemosphere lideran el volumen acumulado de publicaciones en los últimos años, reflejando su

posicionamiento como fuentes clave para investigaciones relacionadas con el desarrollo y aplicación de tecnologías sostenibles en el tratamiento de aguas. Asimismo, revistas como *Journal of Hazardous Materials and Separation and Purification Technology* también presentan un crecimiento constante, mostrando la diversificación del interés científico hacia procesos de mitigación de contaminantes peligrosos y métodos de purificación avanzados.

El patrón de incremento en las publicaciones evidencia una tendencia global creciente hacia la investigación de tecnologías más eficientes para el tratamiento de aguas residuales, respondiendo a la necesidad de abordar problemas ambientales críticos. La contribución de estas revistas ha sido crucial para consolidar la electrocoagulación como una herramienta eficaz en la remediación de aguas contaminadas, estimulando avances tanto en su implementación práctica como en su estudio teórico.

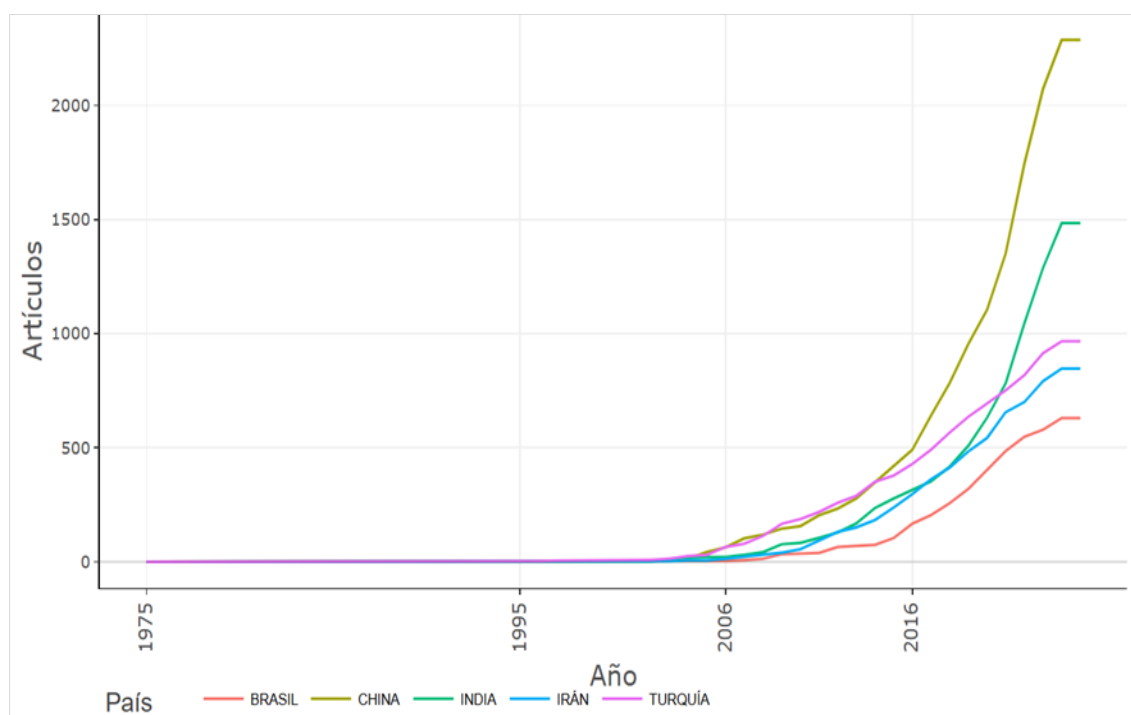


Figura 6. Producción y publicación científica anual de artículos científicos en la base de datos de Scopus por países con relación al tiempo (años)

La Figura 6 muestra la evolución temporal de la producción científica anual de artículos relacionados con la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales en la base de datos Scopus, desglosada por los países más destacados: Brasil, China, India, Irán y Turquía, desde 1975 hasta 2024.

Se observa un crecimiento exponencial en la cantidad de publicaciones a partir de la década de 2000, siendo China el país con mayor contribución científica en este campo. Su producción ha crecido de manera sostenida y destacada, alcanzando el mayor número de publicaciones en comparación con los otros países. India e Irán también muestran una tendencia significativa de crecimiento, consolidándose como líderes en la investigación de tecnologías avanzadas de tratamiento de aguas. Turquía y Brasil, aunque con un menor volumen de publicaciones, también presentan una evolución constante, lo que refleja el interés creciente en la región.

Este análisis destaca el papel fundamental de China y otros países en vías de desarrollo en la generación de conocimiento y avances tecnológicos en el tratamiento de aguas residuales, impulsados por la necesidad de abordar problemas medioambientales críticos. La tendencia ascendente refleja la consolidación de la electrocoagulación como una alternativa eficaz y relevante en la comunidad científica global.

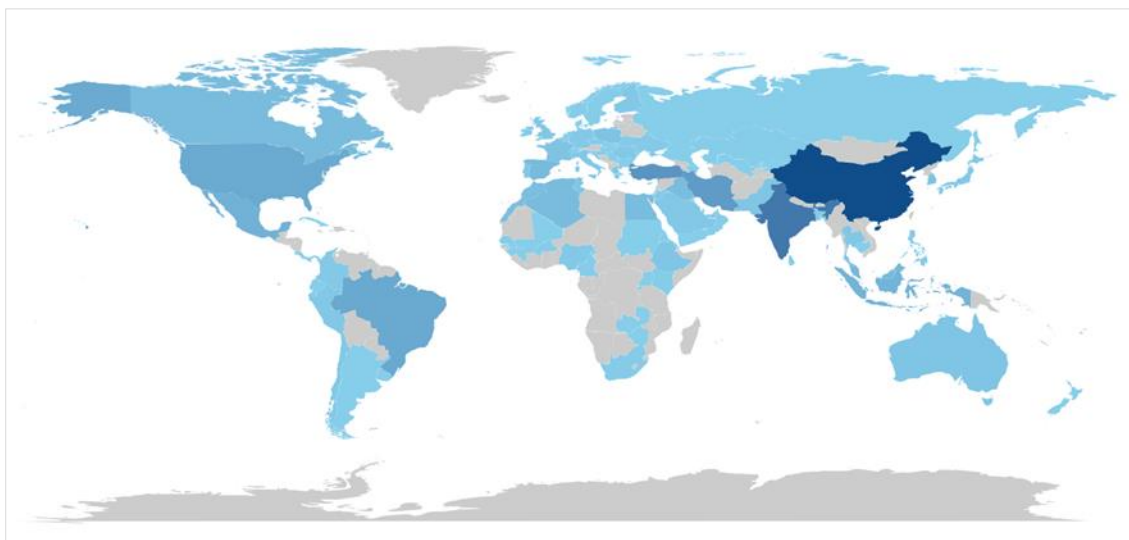


Figura 7. Producción y publicación científica anual de artículos científicos en la base de datos de Scopus por países, con temáticas relacionado a la aplicación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales entre los años 1975 y 2024

La Figura 7 presenta un mapa mundial que ilustra la distribución geográfica de la producción científica relacionada con la electrocoagulación aplicada al tratamiento de aguas residuales, basada en publicaciones en la base de datos Scopus entre 1975 y 2024. Los países están representados con diferentes tonalidades de azul, donde un tono más oscuro indica un mayor volumen de artículos publicados, mientras que los tonos más claros reflejan menor actividad científica en esta temática. Las áreas en gris representan países con ausencia de publicaciones o sin datos registrados en este campo.

China destaca como el principal contribuyente, evidenciado por el tono azul oscuro que domina el mapa, lo que reafirma su liderazgo en la producción científica en esta área específica. Otros países como India, Irán, Turquía y Brasil también muestran una notable participación, con tonalidades intermedias que indican una actividad científica significativa pero menor en comparación con China. En América Latina, Brasil lidera la contribución en la región, mientras que otras áreas como África y algunas regiones de Europa tienen una representación científica limitada o nula.

El mapa refleja una tendencia de concentración en países en vías de desarrollo o emergentes, que enfrentan mayores desafíos relacionados con el tratamiento de aguas residuales y buscan soluciones innovadoras como la electrocoagulación. Además, resalta una disparidad en la distribución de la investigación científica a nivel global, con una participación mucho menor de países desarrollados en comparación con naciones emergentes.

3.3. Revisión sistemática de los resultados por clusters

3.3.1. Cluster 1 (Electrocoagulación, Tratamiento de aguas residuales, Proceso electroquímico)

El proceso de electrocoagulación es altamente eficaz para la eliminación de compuestos orgánicos en aguas residuales. En un sistema híbrido con otros procesos, las tasas de eliminación de demanda química de oxígeno (DQO) alcanzaron el 92%, 91% y 94%, lo que resalta la eficiencia del tratamiento combinado (Sen et al., 2024). La cantidad de DQO, carbono orgánico total (COT) y nitrógeno total (NT) eliminada por unidad de peso de ion metálico durante la electrocoagulación, se relacionaba linealmente con la concentración residual del contaminante (Tanatti & Sezer, 2024).

El proceso de electrocoagulación con electrodos metálicos, logra una eficacia de degradación del 75% para la DQO y del 100% para el color y la turbidez de las aguas residuales industriales de la almazara de palma

(Pani et al., 2022); además se identificó una eficacia de eliminación de microplásticos del 100%, con el proceso electrocoagulación asistido con electroflotación y el proceso de microfiltración por membrana (Akarsu et al., 2021).

3.3.2. Cluster 2 (Agua residual, coagulación, Remoción de metales pesados)

El sistema de electrocoagulación con electrodos bipolares de aluminio logra eficiencias máximas de eliminación de 99,73% para plomo, 98,54% para cadmio y 98,92% para cobre, bajo condiciones óptimas de pH 10, una corriente de 1,4 amperios y un tiempo de reacción de 60 minutos (Aljaberi & Hawaas, 2023). Bajo condiciones óptimas (pH neutro, densidad de corriente de 12,5 mA/cm² y 1 g/L de NaCl), el proceso heterogéneo de electrocoagulación-Fenton, logra una eficacia de decoloración del 94% y una tasa de mineralización del 85% del colorante Amarillo 2G en aguas residuales sintéticas (Benhadji & Ahmed, 2020). El proceso combinado de electrocoagulación y ultrafiltración elimina más del 99% del zinc, además de remover completamente los sólidos en suspensión y el aceite graso de las aguas residuales del galvanizado, a un pH óptimo de 9,0 y una densidad de corriente de 5 mA/cm² (Öztel et al., 2020).

3.3.3. Cluster 3 (Optimización, Electroodos de aluminio, Demanda química de oxígeno, análisis de costo)

El proceso de electrocoagulación es muy eficaz para la eliminación de cadmio en diversas condiciones y destacando el papel de la difusión intrapartícula en la adsorción, principalmente en aguas contaminados con metales pesados, un aspecto poco estudiado hasta ahora (Mehri et al., 2021); en cuanto a la eliminación del hierro y el manganeso, el proceso logra tasas de eliminación del 96,8% y del 66% respectivamente en condiciones óptimas, resultando ser viablemente económica (Almukdad et al., 2021).

Se identificó la eficacia del proceso con electrodos de aluminio en el tratamiento de aguas residuales de la industria azucarera, enfocándose en la eliminación de contaminantes como el color y la DQO, subrayando el potencial del aluminio como coagulante rentable y eficaz (Sahu, 2019). En la eliminación de parámetros como: demanda química de oxígeno, los sólidos totales en suspensión y la turbidez de las aguas residuales, los electrodos de aluminio actúan eficientemente (Ardhianto & Bagastyo, 2019).

En cuanto a aguas residuales de la industria láctea, con niveles elevados de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y DQO, se generó valores óptimos de remoción de parámetros orgánicos (Qasim & Mane, 2013); así mismo, el tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios mediante electrocoagulación, se destaca por ser sencillo, eficaz y rentable, se abordaron los desafíos que presentan los lixiviados, los cuales contienen contaminantes complejos y variables, como altas concentraciones de materia orgánica y metales pesados, logrando reducir estos contaminantes para cumplir con las normativas ambientales de vertido, significando una opción económica y viable para el tratamiento de este tipo de aguas residuales (Rusdianasari et al., 2017).

3.3.4. Cluster 4 (Electrodos de hierro, aguas residuales industriales, eficiencia de remoción)

Los estudios han demostrado que la electrocoagulación es efectiva en la eliminación de contaminantes de diversos tipos de aguas residuales. En el caso de aguas residuales de invernaderos de tomate, se alcanzó una remoción de fósforo del 88.6% con una densidad de corriente de 2.0 A/m², y el aumento de esta también mejoró la eliminación de nitrógeno y compuestos orgánicos (Mielcarek et al., 2024). Asimismo, el tratamiento de aguas residuales de granjas de ganado mediante electrocoagulación con ánodos de magnesio, aluminio y hierro mostró que el magnesio fue el más eficiente, alcanzando una remoción de fósforo total del 96.67%, mientras que el aluminio fue el más rentable con una eficiencia del 94.57% (Chen et al., 2023).

Por otro lado, la electrocoagulación con electrodos de hierro es eficaz para tratar aguas residuales sépticas, logrando la remoción del 97.8% de amoníaco, 95.8% de sólidos suspendidos totales, 85.2% de aceite y grasa, y 54.67% de DQO en 60 minutos de tratamiento (Cruz et al., 2020). En cuanto a aguas residuales hospitalarias con cefazolin, la combinación de electrodos de aluminio y hierro remueve efectivamente el antibiótico, la DQO y la turbidez, con mejores resultados a un pH neutro y tiempos de reacción más largos (Esfandyari et al., 2019).

Finalmente, estudios sobre aguas residuales de biodiésel utilizando electrocoagulación con electrodos de hierro alcanzaron una remoción del 91.74% de DQO y 91.98% de COT, superando a los electrodos de aluminio en eficiencia. En otros casos, la electrocoagulación ha sido efectiva para la eliminación del tinte verde brillante y los residuos de lecherías, logrando remociones del 99.59% y 93.26% de DQO, respectivamente, en condiciones óptimas (Nandi & Patel, 2017; Aoudjehane & Benatallah, 2015).

3.3.5. Cluster 5 (Electrodo de aluminio, turbiedad)

El método desarrollado para el tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación con electrodos metálicos y corriente directa resultó altamente eficiente, logrando remociones de 96.22% de color, 100% de DQO y 99.99% de fosfatos en condiciones óptimas. A pesar de algunos desafíos en la filtración del lodo generado, la combinación de electrocoagulación con métodos químicos demostró ser una solución prometedora para la mejora del tratamiento de aguas residuales industriales (Nnaji et al., 2023).

El método con ánodos de aluminio y cátodos de carbón elimina el 60,1% de la materia orgánica, mientras que el uso de metales ferrosos resulta menos efectivo (Suhartana, 2021). Utilizando solamente electrodos de aluminio se evidencia que el proceso de electrocoagulación es efectivo, con condiciones óptimas para cada contaminante: 56,8% de eliminación de DQO, 69,2% de DBO y 99,9% de sólidos suspendidos totales (SST) (Galvão et al., 2020). Los resultados muestran que la electrocoagulación es efectiva al utilizar electrodos de aluminio, con condiciones óptimas para cada contaminante: 56,8% de eliminación de DQO, 69,2% de DBO y 99,9% de SST (Aguilar-Ascon et al., 2020); así mismo, para eliminar el tinte de Ftalocianina de níquel de aguas residuales, se evidencia que este proceso elimina más del 99,9% del colorante en condiciones óptimas, y también genera hidrógeno con un rendimiento energético del 12,5% de la energía eléctrica utilizada (Dermentzis et al., 2020).

3.3.6. Cluster 6 (Agua residual doméstica, lixiviados)

Al combinar coagulación química con electrocoagulación es el método más eficaz y económico para eliminar la urea de aguas residuales, subrayando la necesidad de ajustar la dosis de coagulante para optimizar resultados (Shaban et al., 2023). En términos de eliminación de fósforo, la electrocoagulación puede alcanzar hasta un 93,91% de eficiencia en condiciones óptimas y presenta un buen rendimiento a largo plazo, con soluciones para la pasivación de electrodos (Jiang et al., 2023). Además, la electrocoagulación elimina el fosfato en un 98% ± 2% utilizando hierro o aluminio, siendo el hierro ligeramente más efectivo. La composición de los flóculos y los mecanismos de eliminación dependen de la concentración de oxígeno disuelto, con formación de diferentes óxidos e hidróxidos en función de las condiciones (Yang et al., 2022).

Se demostró que la eficacia de la electrocoagulación para eliminar materia orgánica en aguas residuales depende de optimizar parámetros como el tipo de ánodo, voltaje, tiempo, distancia y pH (Mengistu et al., 2022). También se destaca que ajustar la densidad de corriente y el tiempo de electrólisis mejora la eliminación de contaminantes en lixiviados de vertedero (Muniasamy et al., 2022). Sin embargo, la intensidad de la corriente no afecta significativamente la eficiencia de eliminación de DQO y SST, que puede alcanzar hasta el 95% con filtración (Oktiawan et al., 2021).

La electrocoagulación elimina eficazmente sólidos suspendidos, DQO y DBO, pero no siempre cumple con los límites de nitrógeno y fósforo totales (Koyuncu & Ariman, 2020). La eliminación de fósforo puede superar el 99,99% con condiciones óptimas y electrodos híbridos Aluminio - Hierro, y los electrodos de aluminio son más eficientes que los de hierro (Omwene & Kobya, 2018; Omwene et al., 2018). Otros métodos, como la biodegradación y la degradación fotocatalítica, también lograron altas tasas de eliminación (Mojiri et al., 2019).

3.3.7. Cluster 7 (Agua residual textil, consumo de energía)

La combinación de electrocoagulación y electrooxidación es altamente eficaz para el tratamiento de aguas residuales textiles, logrando una eliminación del 97% de la DQO y el color, lo que permite la reutilización del agua tratada (Asfaha et al., 2022a). Aunque la electrocoagulación sola también es efectiva, su costo es relativamente alto comparado con otras tecnologías, lo que hace que la combinación con electrooxidación sea una opción más rentable y ecológica (Asfaha et al., 2022b). Además, la combinación secuencial de electrocoagulación con ozono es una opción que reduce el tiempo de tratamiento y el impacto ambiental, optimizando el consumo energético (Ahangarnokolaei et al., 2021).

Un estudio reciente identificó condiciones óptimas para lograr una decoloración del 70.9% en aguas residuales textiles con bajo consumo de energía, utilizando un enfoque basado en el modelo de superficie de respuesta para correlacionar variables clave como el pH y la corriente (Lamhar et al., 2024). La adición de agua de mar al proceso de electrocoagulación también mejoró significativamente la eliminación de contaminantes, elevando el pH y la conductividad del agua tratada, con aplicaciones potenciales para reducir los costos operativos en industrias textiles (Ahmed et al., 2024). Además, un modelo adaptable propuesto demostró su eficacia en la remoción de contaminantes en sistemas mixtos de disolventes (Zhang et al., 2020).

La electrocoagulación mostró una eficiencia del 100% en la eliminación del color y del 92% en la DQO en efluentes textiles, mientras que el proceso Fenton solar heterogéneo alcanzó hasta un 91.2% de remoción de DQO en condiciones optimizadas (Da Silva et al., 2024; Castillo-Suárez et al., 2024). En estudios de tratamiento asistido por ultrasonidos, la eficiencia de decoloración alcanzó el 97%, con mayor eficacia a menor concentración de colorantes y corrientes optimizadas (Rai et al., 2023; Lamhar et al., 2024).

3.3.8. Cluster 8 (Electrolisis, reúso de agua)

La electrocoagulación ha mostrado una gran eficacia en la eliminación de contaminantes de aguas residuales industriales, alcanzando una remoción de hasta el 99,86% de DQO, sólidos en suspensión, fósforo, nitrógeno y petróleo en aguas residuales de galvanoplastia, cumpliendo con las normativas de vertido de metales pesados (Zhang et al., 2024). En efluentes de tenerías, el uso de electrocoagulación con coagulantes de óxidos de hierro ha sido eficaz para tratar la DQO recalcitrante, demostrando su viabilidad como tratamiento terciario (Pasciucco et al., 2024).

Investigaciones recientes han destacado el uso de sistemas híbridos, logrando una remoción del 92% de colorantes en aguas residuales con una eficiencia energética notablemente superior a la electrocoagulación tradicional, lo que refuerza su viabilidad para aplicaciones a mayor escala (Teresa Jose et al., 2024). También se ha propuesto el uso de tecnologías como biorreactores de membrana y ósmosis inversa para tratar micropoluentes, mientras se gestionan los lodos de manera sostenible (Biao et al., 2024). Asimismo, se ha estudiado el cultivo de microalgas en aguas residuales para la producción de biocompuestos valiosos, optimizando los procesos para reducir costos (Pereira et al., 2024).

La combinación de electrocoagulación con otros procesos también ha demostrado mejoras significativas en la remoción de contaminantes, aproximadamente del 98,72% de DQO con alta eficiencia energética

(Saeed et al., 2023). En el tratamiento de aguas residuales de lavado de coches, se alcanzó una reducción del 99% de DQO en doble tratamiento (Zivari-Moshfegh et al., 2024), aunque los costos energéticos siguen siendo un desafío, con consumos de hasta 293,33 kWh/m³ (Obi et al., 2024). La integración de procesos también ha mostrado ser altamente efectiva para la remoción de metales pesados y DQO (Nidheesh et al., 2023).

CONCLUSIONES

El análisis bibliométrico ha demostrado un incremento significativo en las publicaciones sobre el tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación en la base de datos de Scopus, especialmente en la última década, lo que refleja el creciente interés de la comunidad científica en esta tecnología sostenible y eficaz para la remoción de contaminantes.

Los estudios revisados destacan la alta eficiencia de la electrocoagulación en la eliminación de una amplia variedad de contaminantes, como metales pesados, DBO, DQO, SST, colorantes y algunos nutrientes. En condiciones óptimas, las tasas de remoción superan en muchos casos el 90%, lo que confirma la viabilidad del proceso para el tratamiento de aguas residuales industriales y municipales.

La electrocoagulación se ha demostrado como una tecnología flexible, que puede adaptarse a diferentes tipos de aguas residuales (industriales, domésticas, agrícolas), utilizando distintos materiales de electrodos, como aluminio, hierro y magnesio, y combinándolo con otras tecnologías (electrooxidación, membranas, ozonización), lo que amplía su aplicabilidad en diversos contextos.

Los avances recientes en la optimización de parámetros operativos han permitido reducir significativamente los costos energéticos y el consumo de electrodos, haciéndola una opción más sostenible. Además, su capacidad para generar menos lodos en comparación con métodos convencionales, y la posibilidad de integrar energías renovables, refuerzan su potencial para contribuir a un tratamiento más ecológico de aguas residuales.

FINANCIAMIENTO

Los autores no recibieron patrocinio para llevar a cabo este estudio-artículo.

CONFLICTO DE INTERESES

El presente artículo no presenta conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, software, supervisión, validación, visualización, redacción -borrador original y redacción -revisión y edición: Chuquimbalqui-Marina, D., Bardalez-Tuesta, C. M., Azabache-Aliaga, Y. D. y Ordóñez-Ruiz, K. M.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Ascon, E., Marrufo-Saldana, L., & Neyra-Ascon, W. (2020). Efficiency of Electrocoagulation Method to Reduce COD, BOD and TSS in Tannery Industry Wastewater: Application of the Box-Behnken Design. *Leather and Footwear Journal*, 20(3), 217-228. <https://doi.org/10.24264/lfj.20.3.1>
- Ahangarnokolaei, M. A., Attarian, P., Ayati, B., Ganjidoust, H., & Rizzo, L. (2021). Life cycle assessment of sequential and simultaneous combination of electrocoagulation and ozonation for textile

- wastewater treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106251. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106251>
- Ahmed, T., Khan, M. H. R. B., Ahsan, A., Islam, N., El-Sergany, M., Shafiquzzaman, M., Imteaz, M., & Al-Ansari, N. (2024). Evaluation of the impacts of seawater integration to electrocoagulation for the removal of pollutants from textile wastewater. *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 77. <https://doi.org/10.1186/s12302-024-00896-8>
- Akarsu, C., Kumbur, H., & Kideys, A. E. (2021). Removal of microplastics from wastewater through electrocoagulation-electroflotation and membrane filtration processes. *Water Science and Technology*, 84(7), 1648-1662. <https://doi.org/10.2166/wst.2021.356>
- Aljaberi, F. Y., & Hawaas, Z. A. (2023). Electrocoagulation removal of Pb, Cd, and Cu ions from wastewater using a new configuration of electrodes. *MethodsX*, 10, 101951. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101951>
- Almukdad, A., Hawari, A. H., & Hafiz, M. (2021). An Enhanced Electrocoagulation Process for the Removal of Fe and Mn from Municipal Wastewater Using Dielectrophoresis (DEP). *Water*, 13(4), 485. <https://doi.org/10.3390/w13040485>
- Aoudjehane, M., & Benatallah, M. E. (2015). Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using iron electrodes. *Traitement des eaux résiduaires d'une laiterie par électrocoagulation avec des électrodes de fer. Water Quality Research Journal*, 50(2), 198-209. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2014.053>
- Ardhianto, R., & Bagastyo, A. Y. (2019). Personal Care Wastewater Treatment With Electro-coagulation and Electro-oxidation. *E3S Web of Conferences*, 125, 03008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912503008>
- Asaithambi, P., Busier Yesuf, M., Milargh Dagmiaw, S., Mekonin Desta, W., Hussen, M., Beyene, D., Sampath, S., Ahmed, M. Z., Sakthivel, P., Thirumurugan, A., Kumar Prajapati, A., & Hariharan, N. M. (2024). Ozone assisted alternating current-electrocoagulation technique for color and COD removal with determination of electrical energy from industrial wastewater. *Separation and Purification Technology*, 350, 127958. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127958>
- Asfaha, Y. G., Zewge, F., Yohannes, T., & Kebede, S. (2022a). Application of hybrid electrocoagulation and electrooxidation process for treatment of wastewater from the cotton textile industry. *Chemosphere*, 302, 134706. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134706>
- Asfaha, Y. G., Zewge, F., Yohannes, T., & Kebede, S. (2022b). Investigation of cotton textile industry wastewater treatment with electrocoagulation process: performance, mineralization, and kinetic study. *Water Science and Technology*, 85(5), 1549-1567. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.061>
- Benhadji, A., & Ahmed, M. T. (2020). Yellow 2G dye degradation by electro-Fenton process using steel electrode as catalysis and its phytotoxicity effect. *Water Science and Technology*. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.361>
- Biao, W., Hashim, N. A., Rabuni, M. F. Bin, Lide, O., & Ullah, A. (2024). Microplastics in aquatic systems: An in-depth review of current and potential water treatment processes. *Chemosphere*, 361, 142546. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142546>
- Castillo-Suárez, L. A., Linares-Hernández, I., Martínez-Miranda, V., Garduño-Pineda, L., Castañeda-Juárez, M., & Teutli-Sequeira, E. A. (2024). Denim industry wastewater treatment by a heterogeneous solar-Fenton process catalyzed by Fe supported on recycled polyethylene terephthalate (PET) by

- ultrasonic modification. *Journal of Environmental Management*, 351, 119929. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119929>
- Chen, P., Li, J., & Xie, N. (2023). Study on Influencing Parameters of Total Phosphorus Degradation in Cattle Farm Wastewater by Electrocoagulation Using Magnesium, Aluminum, and Iron Electrodes. *Water*, 15(23), 4134. <https://doi.org/10.3390/w15234134>
- Cruz, K. D., Villanueva, B. H. A., Martos, M. K. D., Asuncion, A. G., & Esguerra, M. J. S. (2020). Ammonia, oil and grease, and COD reduction of septage wastewater via electrocoagulation using black iron electrodes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 612(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/612/1/012035>
- Da Silva, L. T. V., de Oliveira, A. G., Ribeiro, J. P., Lopes, A. F., da Silva Costa, R., Neto, E. F. A., Carvalhod, T. V., Romero, F. B., Santos Sales, J. V., de Souza, F. T. C., & Nascimento, R. F. do. (2024). Electrocoagulation cell for the production of hydrogen without carbon emission and simultaneous treatment of textile wastewater. *International Journal of Hydrogen Energy*, 64, 906-913. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.03.310>
- Dermentzis, K., Karakosta, K., Kosheleva, R., & Kokkinos, N. (2020). Electrochemical Remediation of Phthalocyanine Dye Wastewater and simultaneous Hydrogen Production. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 13(6), 22-25. <https://doi.org/10.25103/jestr.136.04>
- Esfandyari, Y., Saeb, K., Tavana, A., Rahnavard, A., & Fahimi, F. G. (2019). Effective removal of cefazolin from hospital wastewater by the electrocoagulation process. *Water Science and Technology*, 80(12), 2422-2429. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.003>
- Galvão, N., de Souza, J. B., & Vidal, C. M. de S. (2020). Landfill leachate treatment by electrocoagulation: Effects of current density and electrolysis time. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104368. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104368>
- Gao, L., Liu, W., Cui, M., Zhu, Y., Wang, L., Wang, A., & Huang, C. (2021). Enhanced methane production in an up-flow microbial electrolysis assisted reactors: Hydrodynamics characteristics and electron balance under different spatial distributions of bioelectrodes. *Water Research*, 191, 116813. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116813>
- Gheraout, D., Elboughdiri, N., & Alghamdi, A. (2020). The role of electrocoagulation process in the removal of emerging pollutants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 17(6), 2801-2816.
- Jiang, C., Liu, Y., Zhang, C., & Li, X. (2023). Study on influencing parameters and long-term operation of electrocoagulation phosphorus removal from small rural domestic sewage. *Water Science & Technology*, 87(8), 1866-1878. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.112>
- Koyuncu, S., & Ariman, S. (2020). Domestic wastewater treatment by real-scale electrocoagulation process. *Water Science and Technology*, 81(4), 656-667. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.128>
- Kumar, A., & Pal, P. (2019). Assessing the feasibility of industrial wastewater treatment using AOPs coupled with membrane technologies. *Journal of Cleaner Production*, 221, 693-706.
- Lamhar, R., Kambuyi, T. N., Bejjany, B., Kherbeche, A., Digua, K., & Dani, A. (2024). Electrocoagulation for the decolorization of textile wastewater in single-channel reactor: Response surface methodology for optimization and a novel model exploitation. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141900. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141900>
- Li, Y., Zhao, X., & He, Z. (2021). Integrating membrane technology in sustainable wastewater treatment.

Water Research, 190, 116682.

- Liu, R., Wei, W., & Zhao, X. (2020). Sustainable approaches in advanced wastewater treatment: A review of current technologies. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(25), 31022-31036.
- Mao, Y., Zhao, Y., & Cotterill, S. (2023). Examining Current and Future Applications of Electrocoagulation in Wastewater Treatment. *Water*, 15(8), 1455. <https://doi.org/10.3390/w15081455>
- Mehri, M., Fallah, N., & Nasernejad, B. (2021). Mechanisms of heavy metal and oil removal from synthetic saline oilfield produced water by electrocoagulation. *npj Clean Water*, 4(1), 45. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00135-0>
- Mengistu, L. R., Samuel, Z. A., Kitila, C. D., & Bayu, A. B. (2022). Comparison Study on Sonodirect and Sonoalternate Current Electrocoagulation Process for Domestic Wastewater Treatment. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 1-13. <https://doi.org/10.1155/2022/3477995>
- Mielcarek, A., Bryszewski, K. Ł., Rodziewicz, J., Kłobukowska, K., & Janczukowicz, W. (2024). Phosphorus Removal Rate and Efficiency in an Electrochemical Sequencing Reactor for the Treatment of Wastewater with Low Organic Carbon Content. *Energies*, 17(6), 1352. <https://doi.org/10.3390/en17061352>
- Mojiri, A., Zhou, J. L., Ohashi, A., Ozaki, N., & Kindaichi, T. (2019). Comprehensive review of polycyclic aromatic hydrocarbons in water sources, their effects and treatments. *Science of The Total Environment*, 696, 133971. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133971>
- 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)
- Moradi, M., Vasseghian, Y., Arabzade, H., & Mousavi Khaneghah, A. (2021). Various wastewaters treatment by sono-electrocoagulation process: A comprehensive review of operational parameters and future outlook. *Chemosphere*, 263, 128314. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128314>
- Moreno-Cabrera, G. A., Alvarez-Arteaga, G., Orozco-Hernández, M. E., & Reyes-Zuazo, M. A. (2021). Tratamiento primario de aguas almacenadas en estanques rústicos mediante la aplicación de coagulantes químicos y biológicos. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 8(2). <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2734>
- 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>
- Muniasamy, S. K., Gamede, T. T., Mallaian, L. S., Rengaraju, I., Segaran, J., Periyasamy, Y., Murugesan, P., & Subramanian, S. (2022). Investigation on Solar-Powered Electrocoagulation (SPEC) for the Treatment of Domestic Wastewater (DWW). *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2022/5389340>
- Nandi, B. K., & Patel, S. (2017). Effects of operational parameters on the removal of brilliant green dye from aqueous solutions by electrocoagulation. *Arabian Journal of Chemistry*, 10, S2961-S2968. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.11.032>
- Nidheesh, P. V., Murshid, A., & Chanikya, P. (2023). Combination of electrochemically activated persulfate process and electro-coagulation for the treatment of municipal landfill leachate with low biodegradability. *Chemosphere*, 338, 139449. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139449>

- Nnaji, P. C., Ume, C. S., Obasi, R. U., Anadebe, V. C., Ezemagu, I. G., Okeke, B. U., Ude, C. J., & Onukwuli, O. D. (2023). Machine learning-based performance evaluation and sludge characterization studies of oxidized starch-aluminum electrode assisted by direct current treatment of dye laden wastewater. *Results in Engineering*, 20, 101576. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101576>
- Obi, C. C., Nwabanne, J. T., Igwegbe, C. A., Abonyi, M. N., Umembamalu, C. J., & Kamuche, T. T. (2024). Intelligent algorithms-aided modeling and optimization of the deturbidization of abattoir wastewater by electrocoagulation using aluminium electrodes. *Journal of Environmental Management*, 353, 120161. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120161>
- Oktiawan, W., Priyambada, I. B., Aji, S., & Budi, F. S. (2021). Effect of current strength on electrocoagulation using Al-Fe electrodes in COD and TSS removal of domestic wastewater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 623(1), 012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/623/1/012080>
- Omwene, P. I., & Kobya, M. (2018). Treatment of domestic wastewater phosphate by electrocoagulation using Fe and Al electrodes: A comparative study. *Process Safety and Environmental Protection*, 116, 34-51. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.01.005>
- Omwene, P. I., Kobya, M., & Can, O. T. (2018). Phosphorus removal from domestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes. *Ecological Engineering*, 123, 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.025>
- Öztel, M. D., Kuleyin, A., & Akbal, F. (2020). Treatment of zinc plating wastewater by combination of electrocoagulation and ultrafiltration process. *Water Science and Technology*, 82(4), 663-672. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.357>
- Pani, N., T. S., A. S., Menon, P. M., Boruah, S., Patel, B., & Kaul, D. S. (2022). Electrocoagulation followed by sound agitation for removal of nitrogen and carbon-based pollutants from industrial wastewater. *Water Science and Technology*, 86(11), 2861-2877. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.364>
- Pasciucco, E., Pasciucco, F., Iannelli, R., & Pecorini, I. (2024). A Fenton-based approach at neutral and unconditioned pH for recalcitrant COD removal in tannery wastewater: Experimental test and sludge characterization. *Science of The Total Environment*, 926, 172070. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172070>
- Pereira, A. S. A. de P., Silva, T. A., Magalhães, I. B., Ferreira, J., Braga, M. Q., Lorentz, J. F., Assemany, P. P., Couto, E. de A. do, & Calijuri, M. L. (2024). Biocompounds from wastewater-grown microalgae: a review of emerging cultivation and harvesting technologies. *Science of The Total Environment*, 920, 170918. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170918>
- Qasim, W., & Mane, A. V. (2013). Characterization and treatment of selected food industrial effluents by coagulation and adsorption techniques. *Water Resources and Industry*, 4, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2013.09.005>
- Rai, P. K., Kant, V., Sharma, R. K., & Gupta, A. (2023). Process optimization for textile industry-based wastewater treatment via ultrasonic-assisted electrochemical processing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 122, 106162. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106162>
- Rakhmania, Kamyab, H., Yuzir, M. A., Abdullah, N., Quan, L. M., Riyadi, F. A., & Marzouki, R. (2022). Recent Applications of the Electrocoagulation Process on Agro-Based Industrial Wastewater: A Review. *Sustainability*, 14(4), 1985. <https://doi.org/10.3390/su14041985>
- Rusdianasari, Taqwa, A., Jaksen, & Syakdani, A. (2017). Treatment of landfill leachate by

- electrocoagulation using aluminum electrodes. *MATEC Web of Conferences*, 101, 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710102010>
- Saeed, O. F., Hameed, K. W., & Abbar, A. H. (2023). Treatment of vegetable oil refinery wastewater by sequential electrocoagulation-electrooxidation process. *Journal of Environmental Management*, 342, 118362. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118362>
- Sahu, O. (2019). Suitability of aluminum material on sugar industry wastewater with chemical and electrochemical treatment processes. *International Journal of Industrial Chemistry*, 10(4), 335-347. <https://doi.org/10.1007/s40090-019-00196-8>
- Sen, A., Akarsu, C., Bilici, Z., Arslan, H., & Dizge, N. (2024). Treatment of tomato paste wastewater by electrochemical and membrane processes: process optimization and cost calculation. *Water Science & Technology*, 89(7), 1879-1890. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.079>
- Shaban, A., Basiouny, M. E., & AboSiada, O. A. (2023). Evaluation of Using Sequential Electrocoagulation and Chemical Coagulation for Urea Removal from Synthetic and Domestic Wastewater. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(11), 723. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06743-5>
- Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22, 154-169. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>
- Suhartana. (2021). The effectiveness of anode variations for electrocoagulation and its application for laundry wastewater treatment. *Journal of Physics: Conference Series*, 1943(1), 012182. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1943/1/012182>
- Tabash, I., Elnakar, H., & Khan, M. F. (2024). Optimization of iron electrocoagulation parameters for enhanced turbidity and chemical oxygen demand removal from laundry greywater. *Scientific Reports*, 14(1), 16468. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67425-8>
- Tanatti, N. P., & Sezer, M. (2024). Optimizing electrocoagulation for poultry slaughterhouse wastewater treatment: a fuzzy axiomatic design approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(21), 31159-31173. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33069-4>
- Teresa Jose, J., K.L., P., Chellappan, S., S., S., Remesh, A., Venkidesh, V., A.J., K., Pugazhendhi, A., Selvam, S., V., B., & M.S., I. (2024). A hybrid electrocoagulation-biocomposite adsorption system for the decolorization of dye wastewater. *Environmental Research*, 252, 118759. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118759>
- Yang, Y., Li, Y., Mao, R., Shi, Y., Lin, S., Qiao, M., & Zhao, X. (2022). Removal of phosphate in secondary effluent from municipal wastewater treatment plant by iron and aluminum electrocoagulation: Efficiency and mechanism. *Separation and Purification Technology*, 286, 120439. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120439>
- Zaied, B. K., Rashid, M., Nasrullah, M., Zularisam, A. W., Pant, D., & Singh, L. (2020). A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. *Science of The Total Environment*, 726, 138095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138095>
- Zhang, L., Qin, L., Ma, L., Shen, Z., Jin, Y., & Chen, S. (2024). Treatment of electroplating wastewater using electrocoagulation and integrated membrane. *Water Science & Technology*, 89(9), 2538-2557. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.136>
- Zhang, W., Chen, X., Wang, Y., Wu, L., & Hu, Y. (2020). Experimental and Modeling of Conductivity for Electrolyte Solution Systems. *ACS Omega*, 5(35), 22465-22474.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03013>

Zivari-Moshfegh, F., Nematollahi, D., Shanesaz, S., Sadeghinia, A., Abedi, M., Pakizeh, S., Torabi, M., Sepehrmansourie, H., Koohsar, R., Torabi, S., & Masoudinia, N. (2024). Hybrid-process including electrocoagulation for the real carwash wastewater treatment using a new continuous undivided tubular reactor. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 195, 109625. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109625>