

Revisión de tratamientos de aguas residuales y su enfoque en procesos de electrocoagulación (EC)

Review of wastewater treatment and its focus on electrocoagulation (EC) processes

María Claudia Ochoa Fajardo¹, Yelitza Aguas Mendoza²

Resumen

La demanda actual en el uso del recurso agua producto de las dinámicas de desarrollo de la industria, agricultura, expansión urbana, entre otros, se traducen en aguas residuales con cargas orgánicas e inorgánicas altas que contribuyen al deterioro de los cuerpos de aguas superficiales y al ecosistema. La necesidad de aplicar las tecnologías ya existentes en el tratamiento de estas aguas es un reto para cada sector, además de la búsqueda de nuevas alternativas de tratamiento sostenibles con el ambiente. Este trabajo tiene por objetivo conocer los principales tratamientos sobre aguas residuales, con enfoque en el tratamiento de electrocoagulación, a través de la búsqueda de información bibliográfica en las diferentes bases de datos a nivel mundial (Scopus, Scencedirect, Springerlink, etc.) en conjunto con un análisis de redes bibliométricas en el programa VOSviewer, de 453 resultados de trabajos tipo artículos científicos y revisiones publicados sobre tratamientos de aguas residuales en general. Los análisis arrojan tres principales tendencias de tratamientos: las alternativas, empleando microorganismos y compuestos bioactivos naturales; los tratamientos por Oxidación Avanzada y los electroquímicos, incluyéndose la electrocoagulación. Sobre este último se abordan 50 documentos entre artículos científicos y revisiones, analizando los principales factores que afectan su eficiencia, la aplicación en tratamientos híbridos y asistidos por coagulantes naturales. Con la revisión de la temática, se puede afirmar que los desafíos actuales en el tratamiento de aguas residuales deben estar enfocados hacia la sostenibilidad ambiental, cobijados bajo estudios de costos y beneficios, logrando la maduración tecnológica e implementación en plantas de tratamiento.

Palabras clave: tecnologías, electroquímica, bibliométricas, efluentes.

1 Bióloga. Universidad de Sucre. Correo: ochoafajardomaria@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8710-8393z>.

2 Doctor en Ingeniería. Magíster en Ingeniería Ambiental. Ingeniera química. Docente titular Universidad de Sucre. Correo: yelitza.aguas@unisuc.edu.co. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4880-4510>.

Abstract

The current demand in the use of water resources as a result of the development dynamics of industry, agriculture, urban expansion, among others, translates into wastewater with high organic and inorganic loads that contribute to the deterioration of surface water bodies and the ecosystem. The need to apply existing technologies in the treatment of these waters is a challenge for each sector, in addition to the search for new environmentally sustainable treatment alternatives. This work aims to know the main treatments on wastewater, with a focus on electrocoagulation treatment, through the search for bibliographic information in the different databases worldwide (Scopus, Scimedirect, Springerlink, etc.) together with an analysis of bibliometric networks in the VOSviewer program, of 453 results of works such as scientific articles and reviews published on wastewater treatment in general. The analyzes reveal three main treatment trends: alternatives, using microorganisms and natural bioactive compounds; Advanced Oxidation and electrochemical treatments, including electrocoagulation. On the latter, 50 documents are addressed, including scientific articles and reviews, analyzing the main factors that affect its efficiency, the application in hybrid treatments and those assisted by natural coagulants. With the review of the subject, it can be affirmed that the current challenges in wastewater treatment must be focused on environmental sustainability, sheltered under studies of costs and benefits, achieving technological maturation and implementation in treatment plants.

Keywords: technologies, electrochemistry, bibliometrics, effluents.

Introducción

Un gran porcentaje de aguas residuales sin tratamiento, generadas a nivel mundial por los diferentes sectores de producción, termina siendo vertida a cuerpos de agua ocasionando el deterioro de los ecosistemas (Z. Chen *et al.*, 2020). El aumento acelerado de la población mundial implica una demanda de consumo de agua en varios sectores, incluyendo la urbanización, industria, agricultura, entre otros, trayendo consigo los riesgos de alteración de la calidad del agua (van Vliet *et al.*, 2021). Las aguas residuales presentan una alta carga orgánica e inorgánica en la que se resaltan contenido de aceites, metales (Zn, Cu, Pb, Cd) carbono orgánico, fosfatos, además de contenido de arsénico y mercurio que contribuyen a la Demanda Química y Bioquímica de Oxígeno (DQO y DBO) (AlJaberi *et al.*, 2023).

Para el tratamiento de las aguas residuales se han empleado las tecnologías de plantas de tratamiento. Fundamentadas en el tratamiento primario, secundario y terciario por diferentes procesos, empezando por la eliminación de sólidos totales, seguida por

fenómenos de degradación y transformación mediada por microorganismos, y finalmente procesos oxidación convencionales (Rout *et al.*, 2021). Dentro de los tratamientos de aguas residuales se destacan los electroquímicos incluyendo a la electrooxidación (EO) y electrocoagulación (EC) con los cuales se han obtenido altas remociones de contaminantes con electrocoagulantes producidos in situ, promoviendo la formación de flóculos más grandes y estables, con precipitados menos tóxicos para el medio ambiente (Biswas y Goel, 2022).

Particularmente la EC se considera como un proceso avanzando en la mejora de la calidad del agua residual, en materia de remociones de metales pesados, contenido de aceite y microorganismos. Logrando aceptación como una tecnología emergente operada bajo condiciones de corrientes bajas, disminuyendo los costos en electricidad, con fuentes de voltaje a nivel de celdas de combustible, solares y molinos de viento; además de considerarse una alternativa sostenible con el medio ambiente, al no emplearse insumos químicos, y materiales no tóxicos disponibles en suelo y de bajo costo económico para la formación de los electrocoagulantes (Boinpally *et al.*, 2023). En el proceso de electrocoagulación son factores determinantes de su eficiencia, el material de los electrodos (ánodo y cátodo), la distancia establecida entre los electrodos, la densidad de corriente suministrada, las condiciones de pH y el tiempo de operación (Tahreen *et al.*, 2020). Recientemente los procesos de electrocoagulación han cobrado especial interés por su tendencia a la eliminación de contaminantes carcinogénicos, perfilándose para la remoción de estos en aguas residuales como la de la industria petrolera, efluentes considerados como más peligrosos en el deterioro de la calidad de los cuerpos de agua y la vida dentro de los ecosistemas (Yasasve *et al.*, 2022). Esta revisión tiene como objetivo dar a conocer los principales tratamientos sobre aguas residuales, con un enfoque en el tratamiento electroquímico de electrocoagulación.

Método

La información de la producción científica relacionada al tratamiento de aguas residuales se obtuvo con el cumplimiento de las siguientes fases:

Fase 1. Análisis de redes bibliométricas. Búsqueda inicial en bases de datos (Scopus y Science Direct) y motores de búsqueda (Google académico y Pubmed). Empleando las palabras claves: Wastewater, Treatment, Agroindustry, industry.

- Construcción de bitácora de fichas bibliográficas y banco de palabras claves.
- Formulación de Ecuación General con palabras claves para procesamiento en la base de datos Scopus.

- Análisis de redes bibliométricas (programa VOSviewer) de los resultados de la producción científica arrojada en la base de datos.

Fase 2. Tratamientos por electrocoagulación. Para la revisión enfocada en tratamientos con electrocoagulación, se consultaron 50 producciones que incluían revisiones y artículos científicos de este tratamiento en diferentes condiciones de operación con efluentes de la agroindustria e industria en general. La producción científica fue obtenida a través de las bases de datos: Springer Link, Sage Journals, Science Direct, Wiley Online Library, ProQuest.

Para la selección de la producción científica a analizar se tuvieron en cuenta los criterios de inclusión: periodo entre el año 2018 y 2023; artículos científicos y de revisión. Los criterios considerados para la exclusión de la información incluyeron: documentos producto de conferencias y capítulos de libros.

Ecuación General de búsqueda en base de datos Scopus (1)

–TITLE-ABS-KEY (agroindustry OR “Electric fields” OR wastewater OR electrocoagulation OR cassava OR treatment OR membrana OR biofiltration OR algal OR adsorption OR “Activated carbon” OR “Total solids” OR “Biological treatment” OR “Bacterial Consortium” OR biofilm OR bioreactor OR filtration OR oxidation AND “Chemical treatment” OR precipitation OR removal OR reactor OR ozonation OR industry OR “Dairy products” OR “Physical treatment” OR fenton OR domestic OR starch OR brewery OR coffee AND “Electrochemical treatment” OR “Food industry” OR “Oily Wastewaters” OR coagulation AND “Dissolved air flotation” OR electrooxidation OR “Moringa Oleifera” OR “Combined treatments” OR “Opuntia ficus-indica”)

Resultados y Discusión

Análisis de redes bibliométricas

Los resultados obtenidos de la Ecuación 1 corresponden a 453, para los análisis de redes bibliométricas, con el filtrado de los criterios establecidos se seleccionaron 404 artículos científicos y 49 revisiones relacionados a la temática de tratamiento de aguas residuales. El análisis de redes bibliométricas de los resultados representado en la Figura 1, arroja los clusters sobre las tendencias en las temáticas para el tratamiento de aguas residuales como los Tratamientos alternativos, Procesos de oxidación avanzada y Electroquímicos.

Clúster I-Rojo (Tratamientos alternativos). Recientemente los procesos implementados en el tratamiento de los contaminantes orgánicos e inorgánicos producto de

la disposición final de los residuos de la industria en general han surgido en la línea de las nuevas alternativas del cuidado del ambiente, minimizando efectos de contaminación secundarios posterior a su aplicación. Los tratamientos con el uso de microorganismos y coagulantes naturales han permitido dar paso a la implementación de nuevas tecnologías: dentro de ellas se citan a los biorreactores como tratamientos biológicos que incluyen a las bacterias como un componente para la biodegradación del material orgánico presente en el agua.

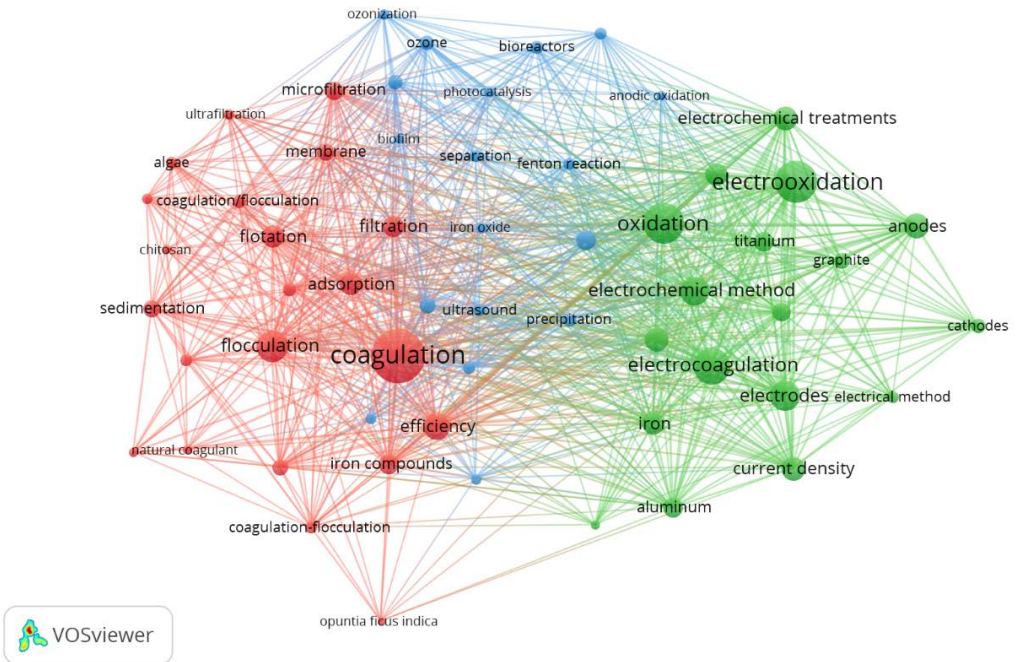
Ozturk *et al.* (2019) implementaron los reactores SBR y reactor de secuenciación por lotes de biopelícula (SBBR) a escala de laboratorio en el tratamiento de aguas residuales de la industria de los lácteos, con eficiencias de eliminación de DQO y NH₄-N mayores para SBBR con aumentos en la concentración de nitrato. Show *et al.* (2020), a través del tratamiento integrado con el reactor de manto de lodos granulares anaeróbicos, reactor de biopelícula portadora aeróbica y biorreactor de lodos activados aeróbicos (GSB-CBR-ASB) comprobaron a gran escala en el rendimiento de la planta de tratamiento la eficiencia de eliminación de DQO casi del 100% en aguas residuales producto de la fabricación de pinturas recalcitrantes.

Asimismo, se ha descrito el papel de las bacterias y microalgas dentro los tratamientos con biopelículas en el procesamiento de aguas residuales producto de la extracción de aceite de palma africana (POME), sugiriendo la aplicación de sistemas híbridos integrando bacterias y microalgas de forma facultativa, llegando a estandarizar factores determinantes para su funcionamiento y mantenimiento (Al-Amshawee *et al.*, 2020). Bachmann Pinto *et al.* (2018) través de un reactor de biopelícula de lecho móvil (MBBR) en el tratamiento de una mezcla de aguas residuales sanitarias, tratadas con pesticidas y lixiviados, lograron la eliminación de DQO en un 77% y remoción del Nitrógeno amónico gracias a los procesos de nitrificación del reactor, sustituyendo procesos de lodos activados también implementados en el tratamiento. Yang *et al.* (2021) implementaron un reactor de biopelícula de lecho móvil acoplado con biorreactor de membrana (MBBR-MBR), en un sistema para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil, con una alta eficiencia en eliminación de la DQO, color y sólidos totales suspendidos, además de la reutilización del agua tratada incorporada a los procesos de fabricación textil sin alterar su calidad final.

Como otra alternativa en el tratamiento de aguas residuales, recientemente las investigaciones se han enfocado en los coagulantes naturales. Para ensayos realizados en aguas residuales de la industria de los lácteos, el uso de coagulantes provenientes de semillas de especies vegetales evidenció un porcentaje de reducción de los niveles de turbidez del 74.23 % y 65.6% para *Cicer arietinum* y *Moringa oleifera* respectivamente (Deepa *et al.*, 2022). Asimismo, los ensayos realizados para la evaluación de la actividad

coagulante de *Opuntia Ficus indica* en el tratamiento de aguas residuales grises evidencian porcentajes de remoción de turbidez de 88.19% y 96.67 de sólidos suspendidos totales (Jaco *et al.*, 2022). Dentro de los métodos alternativos de tratamiento de aguas residuales también se ha evaluado al quitosano como coagulante en aguas residuales producto de la actividad piscícola, con porcentajes de remoción de turbidez de 87% y del 83.1% para sólidos suspendidos volátiles (Rodríguez Jimenez y Gallego Suárez, 2019).

Figura 1. Mapa de análisis de resultados Ecuación general 1 (VOSviewer).



Nota. en el mapa de redes bibliométricas se visualiza la formación de cuatro cluster en las temáticas de Tratamientos alternativos (rojo), Procesos de oxidación avanzada (azul) y Electroquímicos (verde).

Cluster II – Azul (Procesos de oxidación avanzada). Los procesos de oxidación en el tratamiento de aguas residuales resaltan la participación del ion Hidroxilo en la oxidación de la carga de contaminantes presentes en el agua. Los procesos de oxidación avanzada (POA) pueden entenderse como la liberación de los radicales Hidroxilo con alto potencial de oxidación, caracterizados por la poca selectividad en sus reacciones con compuestos orgánicos dado su comportamiento como electrófilo; su mecanismo de acción sobre los contaminantes orgánicos va desde la transferencia de electrones, la extracción de hidrógeno y la combinación de radicales (Mayyahi y Al-asadi, 2018).

La ozonización se destaca dentro de los anteriores por sus ventajas con resultados finales de la descomposición de agua y oxígeno operado a temperaturas y presión ambientales (Malik *et al.*, 2019). Los procesos con el combinado de radiación ultravioleta y Peróxido de hidrógeno son conocidos por la producción de radicales hidroxilo, interviniendo en el tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta los factores como la concentración del Peróxido de Hidrógeno (H_2O_2), las condiciones del líquido y el suministro de la radiación UV (Pandis *et al.*, 2022); proceso como el mencionado en combinación con el Ozono han sido empleados en el tratamiento de aguas residuales con contaminantes aceitosos, con tiempos de exposición óptimos de 80 minutos a pH= 12, con remoción de aceite, DQO y TOC mayores al 50% (Jasim *et al.*, 2020).

Dentro de los procesos de oxidación avanzada también destacan los de tipo Fenton y ultrasonido; en el tratamiento a través de Fenton la catálisis del Peróxido de hidrógeno (H_2O_2) en presencia del hierro (Fe^{+2}) produce al ion Hidroxilo, un agente oxidante de amplio espectro para compuestos de origen orgánico o inorgánico, en estas reacciones las concentraciones de H_2O_2 y Fe^{+2} son determinantes para la producción de $OH\cdot$ (Yildiz y Olabi, 2021). Por otro lado, el ultrasonido es el uso de ondas ultrasónicas en el medio de líquido de tratamiento, que ocasionan la formación de burbujas de tamaño y cantidad variable cuya energía de colapso induce a la pirólisis de las moléculas de agua atrapadas en su interior, esta ruptura produce la formación de hidrógeno e hidroxilos ($OH\cdot$) (Ghasemi *et al.*, 2020). En el tratamiento de aguas residuales de la industria de la pulpa y papel han sido evaluados los procesos de ultrasonido y Fenton en la mejora de la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno; los porcentajes de remoción para los tratamientos independientes y combinados a condiciones óptimas (50 min, 1,2g/L Fe^{+2} y 8g/L H_2O_2) corresponden a 82, 18% para los procesos de Fenton, con un aumento del 90,1% al aplicar ultrasonido; así mismo con la integración del componente de radiación ultravioleta a los anteriores aumentó en un 93.4%, evidenciando que el combinado de sono-foto-Fenton es una potencial estrategia de tratamiento de aguas residuales (Olabi, 2023).

La aplicación de los procesos de oxidación avanzada ha sido empleada en el tratamiento de aguas residuales urbanas, tal es el caso de la investigación realizada por Aguas *et al.* (2019) empleando fotoreactores de luz solar en los procesos Foto-fenton y Peróxido de Hidrógeno. Ambos procesos permitieron la desinfección de los efluentes eliminando los microcontaminantes orgánicos en un 66% y 56% respectivamente; aplicándose al riego de especies vegetales (lechuga y rábano), con un posterior recuento de bacterias en superficies de captación (hojas, frutos y suelo) por debajo de los límites de detección en el 81,2 % y 87,5% de muestras de cultivos de lechuga y rábano evaluadas.

Cluster III- Verde (Tratamientos Electroquímicos): Los métodos electroquímicos para el tratamiento de agua residuales comprende el conjunto de procesos que involucran el suministro de un voltaje constante hacia electrodos (Ánodo y cátodo) metálicos en el medio líquido del efluente; la electrooxidación (EO) se constituye como el método más empleado en el tratamiento de aguas residuales a través de un mecanismo de reacciones electrolíticas en los electrodos empleados, con la formación de cationes e hidróxidos metálicos para la eliminación de contaminantes (Ungureanu *et al.*, 2020). En el tratamiento de los efluentes de la industria textil, especialmente los producidos posterior al teñido con colorantes orgánicos sintéticos, se ha empleado el uso de los procesos de electrooxidación para la reutilización de los efluentes en nuevos teñidos; Pinto *et al.* (2022) a través de un sistema discontinuo con dos etapas de tratamiento, a condiciones de 60 Am/cm² y 100 Am/cm², obtuvieron efluentes con niveles de DQO menores de 200 mg/L con calidad para ser usados de forma exitosa en nuevos procesos de teñidos a nivel industrial. Baía *et al.* (2022) evaluaron la eficiencia del tratamiento de electrooxidación en aguas residuales provenientes de bodegas vinícolas, bajo condiciones continuas a 250 rpm a 900 Am/cm² por un tiempo de 6 horas, con valor de DQO y pH (124 mg/L – 6,40) acordes a los límites de vertimiento de los efluentes permitido en su zona de estudio. La electrooxidación ha sido empleada como tratamientos terciarios en aguas residuales producto de la industria del aceite de palma; la configuración del reactor incluye el uso de los electrodos de material aluminio y hierro, una agitación de 300 rpm e intensidad de corriente de 60 Am/cm², permitiendo resultados en la remoción de la DQO con disminución de 1409 mg/L a 524 mg/L y de 3217 PtCO a 492 mg/L en un tiempo de operación de 120 minutos (Zulzikrami Azner Abidin *et al.*, 2020).

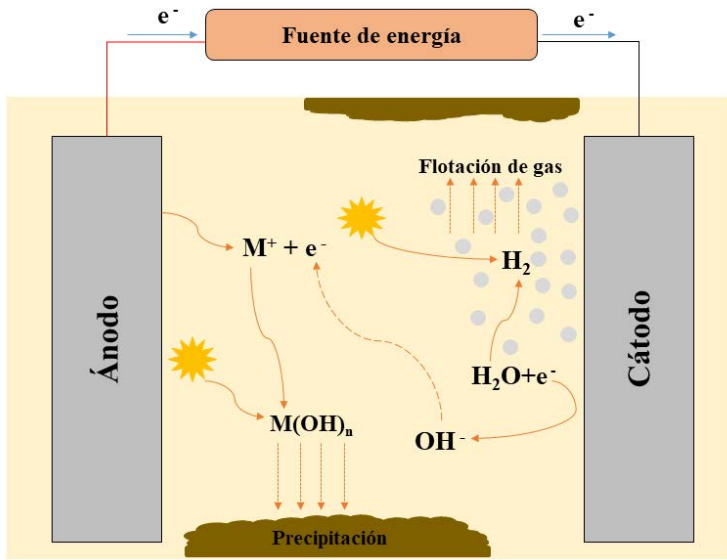
Se ha investigado el efecto de tratamientos electroquímicos como sistemas híbridos de electrooxidación y electrocoagulación en aguas residuales de la industria del biodiesel. La configuración de los sistemas de tratamiento a condiciones óptimas incluye los tratamientos de EC con electrodos de aluminio aplicación de corriente de 0.25 A, pH 6.0, con eficiencias de remoción de DQO del 95,4 con tiempo de reacción de 60 minutos y la EO con electrodo de tipo Ti/SnO₂ (Ánodo) y grafito (Cátodo) con suministro de corriente de 0.5 A de 94,8 % a 150 minutos de reacción; con resultados de un híbrido de ambos sistemas se alcanzaron porcentajes de remoción de DQO de 98.9% de las aguas residuales de biodiesel (Yazici Guvenc *et al.*, 2022).

Tratamientos por Electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electroquímico empleado en el tratamiento de aguas residuales de la industria en general. Este tipo de procesos han cobrado importancia dada su aplicación amigable con el ambiente y la eficiencia en la remoción de contaminantes orgánicos presentes en los efluentes, sumado a su automatización, y operaciones a bajo costo (Asaithambi *et al.*, 2022).

El mecanismo del proceso de electrocoagulación se entiende como el conjunto de reacciones de oxidación y reducción dentro de un sistema conformado por un electrolito que permite la interacción entre los iones de los electrodos (ánodo y cátodo) los cuales reciben un suministro de corriente eléctrica durante un tiempo de operación de tratamiento determinado (Guo *et al.*, 2022). En los electrodos configurados como ánodo (positivo) y cátodo (negativo), al recibir desde una fuente de alimentación corriente eléctrica se da lugar a reacciones químicas de tipo oxidación y reducción como se ilustra en la Figura 2. En el ánodo de sacrificio ocurren procesos de oxidación del metal dando lugar a cationes M^+ , al mismo tiempo en el cátodo la reducción del agua origina hidrógeno gas (H_2) (evidenciado en burbujas desprendidas del cátodo) y iones hidroxilo OH^- que se unirán a los cationes para la formación de hidróxidos metálicos $M(OH)_n$ que actúan como coagulantes en el sistema formando flóculos que serán llevados a la superficie por los gases H_2 y lodos producto de la precipitación del proceso de tratamiento (Biswas y Goel, 2022). Con lo anterior el proceso de electrocoagulación puede entenderse a través de los procesos de adsorción, coagulación y flotación, donde la eficiencia de los hidróxidos metálicos como adsorbentes permite que las moléculas de los contaminantes se adhieran a estos (Das *et al.*, 2022). La electrocoagulación se ha empleado en el tratamiento de una amplia variedad de efluentes, algunas de estas investigaciones se citan en la Tabla 1.

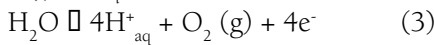
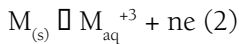
Figura 2. Mecanismo de tratamiento por electrocoagulación.



Nota. El gráfico ilustra los procesos de formación de los electrocoagulantes, y los fenómenos de flotación y precipitado de los contaminantes en el tratamiento por electrocoagulación. Adaptado de “Electrochemical methods for landfill leachate treatment: A review on electrocoagulation and electrooxidation” (p.5), por Z. Guo, 2022, *Science of the Total Environment*, 806.

Las reacciones que dan lugar a proceso se expresan de la siguiente manera (Das *et al.*, 2022):

Ánodo:



Cátodo:

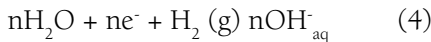


Tabla 1. Investigaciones del proceso de electrocoagulación sobre aguas residuales.

Tipo de aguas residuales	Caracterización inicial	Condiciones óptimas de tratamiento	Remoción (%)	Autor
Porcinas	pH 6.3 SS 4.5 g/L DBO 2000 mg/L DQO 5500 mg/L TP 132 mg/L	Ánodo: Fe Cátodo: acero inoxidable Distancia electrodos: 2,0 cm pH 6,3 35 minutos 30 mA/cm ²	SS 98,5% TP 99,5 % DQO 50,6% DBO 98,5%	(Chen <i>et al.</i> , 2021)
Fabricación de papel	TDS 520 mg/L DQO 5600 mg/L TOC 868.6 mg/L Turbidez 52,24 NTU	Electrodos: Fe pH 8,0 60 minutos 20V	TDS 51% Turbidez 65% TOC 68% DQO 70%	(Hugar y Marol, 2020)
Curtiduría	DQO 6500 mg/L Turbidez 440 NTU Aceites y grasas 350 mg/L PO4-P 17 mg/L	Electrodos: Al Distancia: 5mm pH 2,0 0.6 mA/cm ² 60 minutos	DQO 84% Turbidez 98% Aceites y grasas 97% Fosfato 100%	(Bingul <i>et al.</i> , 2022)
Mataderos Bovinos	DQO 5230 mg/L Color 6100 Pt/Co TSS 187 mg/L	Electrodos: Al Distancia: 2cm 75 mins 4 mA/cm ²	DQO 95% Color 98% TSS 97%	(Hellal <i>et al.</i> , 2023)
Molinos de aceite de palma	DBO 15700 mg/L DQO 26000 mg/L	Electrodos: Al Distancia: 40 mm 8 horas	DBO 96% DQO 91%	(Mohamad <i>et al.</i> , 2022)

Tipo de aguas residuales	Caracterización inicial	Condiciones óptimas de tratamiento	Remoción (%)	Autor
Procesamiento de azúcar	DQO 6000 mg/L	Electrodos: Cu Distancia: 1,5 cm pH 7,0 89,28 A/m ² 120 minutos 1,5 g/L NaCl (Electrolito)	DQO 73%	(Sanni <i>et al.</i> , 2022)
Mataderos avícolas	DQO 2625 mg/L SST 358.5 mg/L Color 2400 PtCo	Electrodos: Al Distancia: 2cm pH 5.83 58,60 minutos 4,21 mA/cm ² 0,18 g/L H ₂ O ₂	DQO 97,89% SST 99,31% Color 98,56%	(Toh <i>et al.</i> , 2023)
Lácteas	DQO — Turbidez —	Electrodos A-U4G (Aleación Al) Distancia: 2 cm pH 7.0 14,3 mA/cm ² 24 minutos	DQO 58% Turbidez 99%	(Aitbara <i>et al.</i> , 2021)
Escorrentía agrícola (pesticidas)	DQO 400 mg/L	Ánodo: Al Cátodo: Acero inoxidable pH 7.0 12,0 mA/cm ² 40 minutos	DQO 100%	(El-Naggar <i>et al.</i> , 2022)

Tipo de aguas residuales	Caracterización inicial	Condiciones óptimas de tratamiento	Remoción (%)	Autor
Acuícolas	Turbidez 404 NTU DQO 758 mg/L DBO 317 mg/L	Electrodos: Al Distancia 5 cm pH 2.0 3.0 A 60 minutos 3,0 g/L NaCl (electrolito)	Turbidez 87,9% DQO 86,4% DBO 76,9%	(Igwegbe <i>et al.</i> , 2021)

Nota. Estudios con aplicación de la electrocoagulación sobre efluentes de la agroindustria. Electrocoagulación (EC); DQO (demanda química de oxígeno); DBO (demanda biológica de oxígeno); SS (sólidos suspendidos); TP (fósforo total); SST (sólidos suspendidos totales); PO4-P (fosfatos); NTU (unidades nefelométricas de turbidez); V(voltios); A (amperios); mA (miliamperios); mm (milímetros). Los símbolos — expresan la ausencia de la información en el artículo revisado.

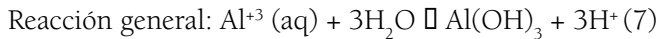
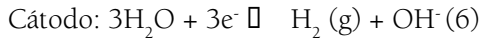
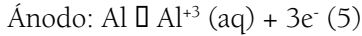
Factores dentro del Proceso de Electrocoagulación (EC)

Los factores relacionados a la eficiencia del proceso de electrocoagulación son el material de los electrodos, distancia entre electrodos, densidad de corriente, influencia del pH y tiempo de operación.

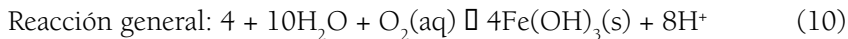
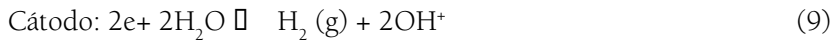
Material de los electrodos

El material del electro cobra importancia dentro del proceso de EC al determinar el tipo de reacción electroquímica que tendrá lugar durante el tratamiento; con una eficiencia relacionada a su medida de disociación, formación de electrocoagulantes y remoción de contaminantes (Tahreen *et al.*, 2020). Dentro de los electrodos más usados en procesos de electrocoagulación se citan a los de aluminio (Al), hierro (Fe) y acero inoxidable, dada su rentabilidad, fácil acceso y eficiencia en el proceso de coagulación con la formación de iones metálicos en las reacciones anódicas (Lourinho y Brito, 2021).

Los electrodos de aluminio son usados comúnmente dentro del proceso de EC. Con el suministro de corriente eléctrica ocurre la disolución de los ánodos de aluminio dando como resultado la formación de cationes Al^{+3} , que finalmente permitirán junto a los productos de la reacción catódica la formación de hidróxidos de aluminio que actuarán como coagulantes, siendo principalmente la forma $Al(OH)_3$ la causante de la formación de los flóculos; las reacciones en electrodos de aluminios son (Das *et al.*, 2022):



Por otro lado, la disolución anódica de electrodos fabricados a base de hierro propicia la presencia de cationes férricos, que bajo ciertas condiciones de pH de ácidas a neutras cercanas a siete pueden dar origen a formas monoméricas y poliméricas al experimentar reacciones de hidrólisis; siendo la forma $\text{Fe}(\text{OH})_3$ la que en solución se evidencia como suspensión gelatinosa que actúa en la remoción de los contaminantes a través de la atracción electrostática o enlazamiento para posterior coagulación. Las reacciones anódicas y catódicas en estos electrodos son (Das *et al.*, 2022):



Las investigaciones en procesos de electrocoagulación con electrodos de aluminio evidencian porcentajes de remoción de DQO del 89,90% a 25 A/m² en efluentes de Turba (Abdul Rahman *et al.*, 2020). En aguas residuales sintéticas las eficiencias de remoción con este tipo de electrodo alcanzaron un 90% a 0,0028 A/m² en términos de turbidez (Jafari *et al.*, 2023). Dentro de los ensayos realizados en el tratamiento de aguas residuales domésticas, la configuración de electrodos de Fe (ánodo) y acero inoxidable (cátodo) permitió la remoción de fosfatos del 98% a 10 mA/cm² (Y. Yang *et al.*, 2022). En la eliminación de microplásticos de aguas residuales, la configuración de ánodo de hierro (Fe) y cátodo de aluminio (Al) con voltaje suministrado de 10V alcanzó la remoción del 96.82% (Hu *et al.*, 2023). Dentro de la EC, electrodos como los fabricados a base de acero han evidenciado resultados satisfactorios en las remociones de color del 95% en efluentes con cargas de tintes a densidades de corriente de 16,6 mA/cm² (Yaqub *et al.*, 2023). En aguas residuales de mataderos electrodos de Al y Fe, permitieron bajo densidades de corriente de 18,18 mA/cm² en tiempos de tratamiento de 40 minutos la remoción de DQO del 80,12% (Adou *et al.*, 2022).

En el tratamiento de aguas residuales producto de la fracturación hidráulica en campos petroleros se obtuvieron porcentajes de remoción de DQO máximas del 42% empleando electrodos de Al, en un tiempo de operación de cinco minutos a corriente suministrada de 5 Amperios (Cao *et al.*, 2022). Nuevas investigaciones para la elaboración de electrodos con materiales alternativos han evaluado el uso de residuos reciclables, elaborando placas metálicas de Al, que bajo condiciones de densidades eléctricas entre 5 y 20 mA/cm², en tiempos de operación de 10 minutos permiten la remoción de color, DQO y turbidez en porcentajes de 97,2%, 88% y 99% de aguas residuales grises (Bani-

Melhem *et al.*, 2023). Por otro lado, dentro los materiales empleados en la fabricación de electros para el proceso de EC está el titanio (Ti), sin embargo, los resultados en contraste con materiales como el Al, evidencian pasivación en los ánodos de Ti, no se producen fenómenos como la electroflotación evidenciada con la nula formación de espuma, además de la formación de flóculos con densidades que no permiten su precipitación (Trompette, 2022). Otro material de electrodos que se ha citado es el magnesio (Mg), en aguas residuales producto de la industria textil, específicamente de la producción de mezclilla, se reporta porcentajes de remoción de DQO, Turbidez y color del 91%, 94% y 93% respectivamente, en un proceso de EC con un arreglo de electrodos de magnesio como ánodo y hierro de cátodo, y combinado con la precipitación química empelando el electrolito CaCl, este último mejorando la conductividad eléctrica y participando en los procesos de precipitación (Zaldivar-Díaz *et al.*, 2023).

Distancia entre electrodos

Varias investigaciones han evaluado el efecto de la distancia entre los electrodos en la eficiencia del proceso de electrocoagulación. Con remociones de DQO, Turbidez y TSS mayores con el aumento de la distancia de 1,0 cm (DQO 95,16%; Turbidez 80% y TSS 80%), 1,5 cm (DQO 95,16%; Turbidez 92,86% y TSS 89,47%) y 2,0 cm (DQO 96,49%; Turbidez 100% y TSS 100%) entre electrodos de Al sobre aguas residuales de turba (Abdul Rahman *et al.*, 2020). En contraste con lo anterior en el tratamiento de aguas residuales con contenidos de manganeso, los porcentajes de remoción son máximos con un 96,5% a distancias cortas entre electrodos de titanio, específicamente de 2cm, en contraste con las remociones de 82,3% obtenidos a 6 cm; lo anterior en consecuencia del aumento de la atracción electrostática, además a distancias mayores la formación de flóculos disminuyó como resultado de la baja producción de iones Ti en los electrodos (Safwat *et al.*, 2023). Una misma distancia de 2cm con electrodos de aluminio fue empleada en el tratamiento de aguas residuales con ácido salicílico, los electrodos empleados en este estudio son perforados y demuestran tener una eficiencia 8% mayor que la de los electrodos convencionales, con remociones del ácido salicílico del 92,1% (Ahmad *et al.*, 2023).

Para electrodos de cobre empleados en el tratamiento de aguas residuales del procesamiento de azúcar, los porcentajes de remoción de DQO presentan un aumento con distanciamientos menores entre los electrodos, siendo del 68%, 65%, 61% y 58% para espacios entre placas con 1cm, 2cm, 2,5cm y 3cm respectivamente. Lo anterior atribuido al aumento de la carga electrostática entre los electrodos y consigo la de colisión de partículas (Patel *et al.*, 2022).

Densidad de Corriente (DC)/Corriente

La DC es el parámetro que determina en los procesos de electrocoagulación la producción de gas H_2 y la disolución del ánodo. Para electrodos de Al a tiempos de operación de 5 minutos, a valores de densidades bajas, se registraron los mayores porcentajes de remoción, disminuyendo al aumentar los valores de DC, para el tratamiento de aguas residuales sintéticas se registran porcentajes de remoción de turbidez del 90% a $0,0028 A/cm^2$ (Jafari *et al.*, 2023). En el tratamiento de aguas residuales de turba, se evaluaron las remociones de Fe y Sólidos suspendidos totales (TSS) a diferentes valores de corriente suministrada, obteniéndose porcentajes de remoción de la concentración de Fe 63,3%, 70,7% y 78,8% a valores de corriente de 1,0 A, 1,4 A y 1,8 A respectivamente; así mismo, para los TSS a amperajes mayores de 1.8 A se lograron reducciones de 128mg/L a 38mg/L, datos que evidencian que a mayor corriente, se da la máxima remoción de las concentraciones de los contaminantes, lo anterior atribuido a que corrientes menores no favorecen la formación de hidróxidos metálicos, para esta investigación la de $Al(OH)_3$ al trabajar con electrodos de Al, haciendo que el proceso de EC sea menos eficiente (Amri *et al.*, 2022).

Para la evaluación de la remoción del parámetro de DQO, color y el gasto de electricidad en el tratamiento de aguas residuales de la industria de la destilería se desarrolló el proceso de electrocoagulación con suministro corriente de tipo alterna y directa. Los resultados evidenciaron que la EC con corriente alterna evidencia porcentajes de remoción de 100% y 95% para color y DQO respectivamente a una densidad eléctrica de $0,40 A/dm^2$; con un gasto de electricidad de $3,20 kWh/m^3$ en contraste con las operaciones a corriente directa con gastos de $3,50 kWh/m^3$ con porcentajes de remoción de color y DQO del 90,57% y 86,54% con la misma densidad eléctrica. Lo anterior permitió evidenciar que dada la pasivación por óxidos impermeables y la corrosión anódica producto de la oxidación en operaciones con corriente directa el proceso de EC se hace menos eficiente (Asaithambi *et al.*, 2021). Lo anterior, también evidenciando en el tratamiento de aguas residuales producto de la fabricación de muebles, comprobándose que bajo corriente alterna, se logra a densidades de corriente de $197 A/m^2$ la remoción del 92,9% de DQO del efluente, condiciones que disminuyen la pasivación de electrodos, el desgaste del ánodo y los costos de operación (R. Silva *et al.*, 2023).

Tiempo de tratamiento

Como resultado de las investigaciones realizadas, en los tratamientos de EC, a mayores tiempos de operación los porcentajes de remoción de parámetros como Turbidez, DQO, TOC y TSS se reducen a 93,3%, 89,8%, 88,22% y 87,50% respectivamente a tiempo de 80 minutos (Abdul Rahman *et al.*, 2020). Para efluentes con cargas de

tintes, las eficiencias de remoción de color a tiempos de tratamiento de 6 a 12 minutos evidencian variaciones del 88,72% al 93% respectivamente con electros de acero (Yaqub *et al.*, 2023). Como en las investigaciones anteriores, en el tratamiento de aguas residuales producto de molinos de aceite de palma, a mayores tiempos de electrólisis con aumentos en el suministro de la corriente, los efectos de tratamiento aumentan, dada la mayor producción de hidróxidos metálicos, obteniendo para estos efluentes resultados de remoción de DQO, DBO y Sólidos suspendidos (SS) de 97,21%, 99,26% y 99,00% respectivamente en tiempos de operación de 44.97 minutos y densidades de corriente de 542 mA/cm² (Nasrullah *et al.*, 2022). Un comportamiento también reportado en el tratamiento de aguas residuales de vertederos, con la evaluación de los tiempos de electrólisis en el tratamiento, con la evidencia de aumentos en la remoción de DQO desde los 30 minutos a los 240 minutos de tratamiento, obteniendo resultados de remoción desde 3.3% a 90% respectivamente (Gautam *et al.*, 2022). Lo anterior también puede evidenciarse en el tratamiento de aguas residuales de ebullición del corcho, para este estudio se emplean dosis de electrolitos (NaCl) para el aumento en la conductividad; donde se evidenciaron reducciones en el contenido de DQO a tiempos de operación de 20 minutos y 60 minutos, afirmando que para condiciones de la concentración más alta de NaCl (1,2 g/L) los tiempos de operación disminuyen, además del consumo de electricidad y se obtienen remociones de DQO altas, este hallazgo demuestra que es posible optimizar las condiciones para obtener mejores resultados a menores tiempos y minimizando los costos de operación (Silva *et al.*, 2022).

Condiciones de pH

Como uno de los factores importantes dentro de la EC, el pH afecta la eficiencia del proceso en términos de la formación y solubilidad de los hidróxidos metálicos (Yaqub *et al.*, 2023). Para eficiencias en la remoción de turbidez de aguas residuales sintéticas se reportan cambios en los porcentajes del 80% al 89% con condiciones de pH 7.0 y 7.3 (Jafari *et al.*, 2023). En este mismo sentido, en aguas residuales de destilería se evaluó los porcentajes de remoción de DQO en función del aumento del pH, obteniendo resultados del 95% para valores de 7,0; comprobando mayor eficiencia en condiciones neutras, esto debido a que bajo pH ácido la oxidación de iones ferrosos a férricos disminuye, y consigo los porcentajes de remoción de la demanda química de oxígeno (Asaithambi *et al.*, 2021). En el tratamiento de aguas residuales de mina con condiciones iniciales de pH ácidas, los valores óptimos de operación fueron cercanos a la neutralidad, de 7,1 y 7,2 con la adición de NaCl como electrolito, el cual permitió aumentos en los valores de pH dada la reducción de iones H⁺ por la reducción de iones férricos a ferrosos en electrodos de Fe empleados en el sistema y al aumento de la producción de OH⁻ en el medio (Alam *et al.*, 2022).

Como los ensayos anteriores, en el tratamiento de aguas residuales de la industria papelera, se evidencia mayor eficiencia del proceso de electrocoagulación a medida que el pH es cercano a la neutralidad, la evaluación entre valores de 5,0 a 9,0 demuestra el aumento gradual en la remoción de DQO y color en el rango de 5,0 a 7,0 esto debido a la producción de hidróxidos de hierro de la forma $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Mientras que para pH inferiores a 6 y superiores a 8,0 el proceso resulta menos eficiente. Los porcentajes de DQO y color removidos son del 68% y 94% respectivamente (Kumar y Sharma, 2022).

Electrocoagulación en tratamientos combinados

Dentro de los procesos de tratamiento de aguas residuales, la electrocoagulación ha sido empleada dentro de las fases de pretratamiento asistiendo a procesos de tratamientos de aguas residuales, como los expuestos en la Tabla 2. Tal es el caso del realizado por Lugo *et al.* (2022), en la remoción de bisfenol A y triclosan empleando un sistema de tratamiento por biocatálisis asistido por EC; obteniendo porcentajes de remoción del 42% y 76% respectivamente posterior al tratamiento electroquímico y el 66% y 28% de remoción final en el proceso biocatalítico, siendo la EC un pretratamiento que generó las condiciones favorables al actuar sobre la mayoría de los compuestos que interfieren en la actividad de las enzimas.

Para el tratamiento de aguas residuales producto de la curtiduría, se han empleado tratamientos combinando los procesos electrocoagulación y ozonización precedidos de un proceso de sedimentación. Este último, con un tiempo de residencia de 60 minutos con adición de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de calcio) para la remoción de turbidez del 75%; seguido en el proceso de EC (continua) con el agregado de una solución de poliamida, se evidencian porcentajes de remoción de DQO y color del 67,3% y 95% respectivamente, como resultado de la actividad floculante de la solución agregada. Finalmente, del efluente tratado por ozonización, se obtienen remociones del 38% para DQO (Navas *et al.*, 2022).

Los sistemas híbridos de electrocoagulación y electrooxidación han sido aplicados como tratamiento híbrido en aguas residuales del lavado de contenedores industriales, efluentes con alto contenido en fósforo. La EC es empleada como pretratamiento favoreciendo las condiciones finales del efluente para la EO, permitiendo inicialmente la remoción del fósforo en un 97% evitando la eliminación de los OH^- en el proceso de EO; adicionalmente bajo las condiciones de pH inicial de 7,0 se comprobó la una eficiencia de remoción de DQO del 84%, realizando el tratamiento sin ajuste de pH (Sanni *et al.*, 2022). En otras investigaciones como la de Song *et al.* (2022) aplicaron un reactor de electrocoagulación y electrooxidación en el tratamiento de aguas residuales Cu-EDTA, obteniendo resultados de remoción de DQO y Cu del 90,0% y 95,43% respectivamente empleando en el medio el NaCl (cloruro de sodio) afirmando las ventajas de emplear

este electrolito en el sistema EC-EO en este tipo de efluentes, además de la eficiencia de en la remoción de los contaminantes de las aguas residuales. Con esta misma línea del combinado EC-EO las aguas residuales bovinas han sido tratadas, obteniendo mejoras en la calidad del efluente en relación a DQO, N-NO₃ y N-T con porcentajes de remoción del 70%, 80% y 20% bajo las condiciones óptimas de tratamiento, resaltando la eliminación total de fosfatos durante el proceso de EC e incremento en la remoción de DQO al iniciar la EO; por otra parte, el porcentaje de eliminación de nitratos (N-NO₃) disminuyó al iniciar la EO, lo que se atribuye a la reacción de los hidroxilo con otras formas nitrogenadas dando como resultado nitrato más estable, por lo que se requiere realizar el proceso de EO antes de la EC para la remoción del nitrógeno total (N-T) (Stylianou *et al.*, 2020).

Dentro de las alternativas de tratamientos combinados, la electrocoagulación se ha empleado junto a procesos de electroflotación en el tratamiento de aguas residuales de rendering, como tratamiento primario en la remoción de DQO obteniendo porcentajes de eliminación de 72,0% junto a un 64% de recuperación de grasas, presentando ventajas frente a la recolección de grasas o como sistema de tratamiento primario para efluentes con estas características (Xie *et al.*, 2022).

Tabla 2. *Tratamientos combinados con electrocoagulación.*

Efluente	Tratamiento	Configuración de electrodos	Condiciones de operación	Porcentaje de remoción	Autor (s)
Bisfenol A y triclosan	EC–Bio	3 placas de Al en posición paralela Distancia: 20 mm	pH: 3,0 0,83 mA/cm ² 10 minutos	66% bisfenol A 76% triclosan	(Lugo <i>et al.</i> , 2022)
Industria paneles de fibra	SE- EC–OZ	Ánodo: Al Cátodo: Fe	214,3 A/m ² 20 mins	DQO 90,9% Color 100.0% TS 73.7% SS 99.7%	(Navas -cardenas <i>et al.</i> , 2022)

Efluente	Tratamiento	Configuración de electrodos	Condiciones de operación	Porcentaje de remoción	Autor (s)
Lavado de contenedor industrial	EC- EO	Ánodo: Fe (4) Cátodo: Grafito (4) Distancia: 1.0 cm Ánodos: Ti/IrO ₂ – BDD- MMO	pH: 7,0 0,08 A/cm ² 90 minutos	Fósforo 97% DQO 95%	(Sanni <i>et al.</i> , 2022)
Cu-EDTA	EC- EO	Ánodo: 2 placas RuO ₂ – IrO ₂ /Ti–Al Cátodo: Al	pH: 7,0 10,29 mA/cm ² 60 minutos	DQO 85,01% Cu 99,85%	(Song <i>et al.</i> , 2022)
Aguas residuales bovinas	EC- EO	3 electrodos de Al Distancia: 0,5 cm Electrodo diamante dopado con boro (BDD)	200 A/m ² 2 horas	DQO 70% N-NO ₃ 80% N-T 20%	(Stylianou <i>et al.</i> , 2020)
Rendering	EC – EO	Electrodos horizontales (Laminas) Ánodo: Al Cátodo: Acero inoxidable Distancia: 2cm	2,0 mA/cm ² 15 minutos 100 rpm 24 horas sedimentación	DQO 72,2%	(Xie <i>et al.</i> , 2022)

Nota. Estudios sobre el proceso de electrocoagulación (EC) en combinación con otros procesos de tratamiento en aguas residuales de la industria en general y la configuración del sistema de tratamiento. Bio (biocatálisis); EO (electrooxidación); EF (electroflotación); OZ (ozonación); SE (sedimentación); Al (Aluminio); Fe (Hierro).

Electrocoagulación asistida por coagulantes naturales

Para el tratamiento de aguas residuales se ha incrementado las investigaciones que evalúan el uso de coagulantes naturales, como sustitutos de sales metálicas, hidróxidos metálicos ($\text{Al}(\text{OH})_3$ y $\text{Fe}(\text{OH})_3$), además de coagulantes inorgánicos polimerizados (Cloruro de polialuminio / PAC) (Dayarathne *et al.*, 2021) ampliamente utilizados en el tratamiento del agua. De los coagulantes naturales se destacan los activos extraídos de plantas, destacando las especies como *Monringa oleifera* Lam, *Mussa* L, *Tamarindus Indica* L, *Opuntia stricta* (Haw.) Haw (Nhut *et al.*, 2021; Hussain y Haydar, 2021; Zainol y Nasuha Mohd Fadli, 2020; Chitra y Muruganandam, 2019).

Para los extraídos de las especies del género *Opuntia*, se resaltan investigaciones que han evaluado su absorción como polvo coagulante y la del proceso de electrocoagulación, estableciendo las comparaciones entre estos tipos de tratamiento. Tal es el caso del estudio realizados por (Abrane *et al.*, 2021) en el tratamiento de aguas residuales lácteas; para el método con coagulantes naturales se describe la estructura del polvo de *Opuntia ficus indica*, con láminas rígidas y cavidades de tamaños diferentes que favorecen la absorción, para estos ensayos se obtuvieron porcentajes de remoción para DQO, turbidez y DBO del 50%, 55% y 60% respectivamente con unas dosis óptimas de 1g/L de polvo, pH 7,03 y tiempo de absorción de 30 minutos. Para el tratamiento con electrocoagulación, los ensayos se realizaron con electrodos de aluminio, con 1 cm de distancia entre estos, a densidad de corriente de 15 mA/cm², pH 7,03 y tiempo de operación de 15 minutos, con porcentajes de remoción del 80%, 99% y 98% para DQO, turbidez y DBO respectivamente.

Más allá del estudio comparativo entre ambos tipos de tratamiento, la combinación del proceso de electrocoagulación asistida por mucílago de *O. ficus indica*, ha sido estudiada en la remoción de turbidez de aguas con gel sílice obteniéndose porcentajes de remoción del 93,14% operando a condiciones óptimas del 2.5 mg/L de polvo, 21,2 V, 9.65 pH con conductividad del 2.61 mS/cm, empleando electrodos de aluminio. Reportando aumentos del 30,94% en comparación con el tratamiento de electrocoagulación convencional; además de la disminución del consumo de energía específico con la adición del mucílago (Djerroud *et al.*, 2018).

Dentro de los coagulantes naturales también empleados están los extraídos de la especie *Moringa oleifera*, Gali Aba Lulesa *et al.* (2022) han probado su actividad coagulante en comparación con el proceso de electrocoagulación y el efecto en la mejora de la calidad del agua con el combinado de ambos procesos. El tratamiento solo con *M. oleifera* alcanzó porcentajes de remoción de DQO, DBO, TDS, fosfatos, TSS y color de 85,48%, 78,50% 84,50%, 95,70% y 94,50% respectivamente, con una dosis de 0,5 g, a 50 minutos de contacto y 20 minutos de sedimentación bajo condiciones de pH 11. Por otro lado, con

el proceso de electrocoagulación operado con electrodos de aluminio, pH 11, corriente de 0,5A y tiempo de operación a 50 minutos, se evidencian porcentajes de remoción máximos del 90,50%, 87%, 97,50%, 89,10%, 95,80% y 96,15% para DQO, DBO, TDS, fosfatos, TSS y color respectivamente. Lo anterior evidencia que el tratamiento solo con el coagulante natural y el EC asistido por este, presentan diferencias en términos de la remoción de algunos parámetros; para el coagulante de *M. olifera* la cantidad de fosfatos eliminados en el proceso es mayor en comparación con el proceso de EC. Sin embargo, se obtienen porcentajes de remoción máximos del 91,47% (DQO), 89,35% (DBO), 97,60% (TDS), 90,20% (fosfato), 96,10% (TSS) y 95,70% (color) con la aplicación de EC asistida por el polvo de *M. oleifera*. con dosis de 0,5 g, pH 11, corriente de 0,5 A y tiempo de reacción de 50 minutos.

Conclusiones

Las investigaciones llevadas a cabo en torno al tratamiento de aguas residuales demuestran la tendencia de la implementación de tratamientos alternativos amigables con el ambiente. Un avance en materia de tecnologías pensadas en la verdadera resolución de las problemáticas de demandas exhaustivas de agua en los diferentes sectores que resultan como efluentes no tratados sin posibilidades de reusarse en las actividades que sea posible. En los procesos de electrocoagulación se resaltan los avances en materia de ensayos a escala de laboratorio en el tratamiento de diferentes tipos aguas residuales, sin embargo, surge la necesidad de investigaciones con escalas de madurez tecnológica que permitan su evaluación y optimización en reactores adaptables a la amplia gama de efluentes que requieren tratamientos.

En este mismo aspecto, dentro de los procesos de electrocoagulación el que se haya evaluado por algunos autores las opciones de suministro de energía para el tratamiento electroquímico, incentiva a futuros estudios que permitan el uso de energías renovables y su implementación junto al sistema de electrocoagulación en las plantas de tratamiento. Es importante resaltar la apuesta por la integración de tratamientos alternativos como los coagulantes naturales, en un sistema híbrido que bajo condiciones óptimas obtenga los máximos porcentajes de remoción en materia de DQO, DBO, turbidez, pH entre otros. La seguridad de agua limpia y saneamiento, la preservación de la vida en ecosistemas acuáticos y terrestres, es sin duda el camino a la sostenibilidad, sin embargo, la amplia variedad de efluentes con cargas orgánica e inorgánica vertidas a suelos y cuerpos de aguas superficiales representa una amenaza. Este panorama se convierte en uno de los más grandes desafíos en términos de ciencia, tecnología e innovación a nivel mundial, una búsqueda de alternativas con eficiencias de remoción altas, manejo adecuado de

subproductos de los procesos y respaldas por el análisis de estudios de costos económicos en la implementación de nuevas tecnologías

Referencias

- Abdul Rahman, N., Albania Linus, A., Gilan, U. J., Jihed, E. E., Kumar, N. K. M. F., Yassin, A., & Philip, A. (2020). Experimental study of batch electrocoagulation treatment of peat water in Sarawak with aluminium electrodes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 778(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/778/1/012126>
- Abrane, R., Hazourli, S., & Eulmi, A. (2021). Comparative study between electrocoagulation and adsorption on the opuntia ficus indica powder for industrial dairy wastewater treatment. *Desalination and Water Treatment*, 228, 153–164. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27342>
- Adou, K. E., Kouakou, A. R., Ehouman, A. D., Tyagi, R. D., Drogui, P., & Adouby, K. (2022). Coupling anaerobic digestion process and electrocoagulation using iron and aluminium electrodes for slaughterhouse wastewater treatment. *Scientific African*, 16, e01238. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2022.e01238>
- Aguas, Y., Hincapie, M., Martínez-Piernas, A. B., Agüera, A., Fernández-Ibáñez, P., Nahim-Granados, S., & Polo-López, M. I. (2019). Reclamation of Real Urban Wastewater Using Solar Advanced Oxidation Processes: An Assessment of Microbial Pathogens and 74 Organic Microcontaminants Uptake in Lettuce and Radish. *Environmental Science and Technology*, 53(16), 9705–9714. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b00748>
- Ahmad, A., Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., & Surampalli, R. Y. (2023). Surfactant aided electrocoagulation/flotation using punched electrodes for the remediation of salicylic acid from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109049. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109049>
- Aitbara, A., Khelalfa, A., Bendaia, M., Abrane, R., Amrane, A., & Hazourli, S. (2021). Treatment of dairy wastewater by electrocoagulation using A-U4G (2017-Al) alloy and pure aluminium as electrode material. *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s41207-020-00227-2>
- Al-Amshawee, S. K., Yunus, M. Y., & Azoddein, A. A. (2020). A Review Study of Biofilm Bacteria and Microalgae Bioremediation for Palm Oil Mill Effluent: Possible Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736(2). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/2/022034>
- Alam, P. N., Yulianis, Pasya, H. L., Aditya, R., Aslam, I. N., & Pontas, K. (2022). Acid mine wastewater treatment using electrocoagulation method. *Materials Today: Proceedings*, 63, S434–S437. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.089>
- AlJaberi, F. Y., Ahmed, S. A., Makki, H. F., Naje, A. S., Zwain, H. M., Salman, A. D., Juzsakova, T., Viktor, S., Van, B., Le, P. C., La, D. D., Chang, S. W., Um, M. J., Ngo, H. H., & Nguyen, D. D. (2023). Recent advances and applicable flexibility potential of electrochemical pro-

- cesses for wastewater treatment. *Science of the Total Environment*, 867(January). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161361>
- Amri, I., Herman, S., Fadhlah Ramadan, A., & Hamzah, N. (2022). Effect of electrode and electric current on peat water treatment with continuous electrocoagulation process. *Materials Today: Proceedings*, 63, S520–S525. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.873>
- Asaithambi, P., Govindarajan, R., Yesuf, M. B., Selvakumar, P., & Alemayehu, E. (2021). Investigation of direct and alternating current-electrocoagulation process for the treatment of distillery industrial effluent: Studies on operating parameters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(2), 104811. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104811>
- Asaithambi, P., Yesuf, M. B., Govindarajan, R., Hariharan, N. M., Thangavelu, P., & Alemayehu, E. (2022). A Review of Hybrid Process Development Based on Electrochemical and Advanced Oxidation Processes for the Treatment of Industrial Wastewater. *International Journal of Chemical Engineering*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1105376>
- Bachmann Pinto, H., Miguel de Souza, B., & Dezotti, M. (2018). Treatment of a pesticide industry wastewater mixture in a moving bed biofilm reactor followed by conventional and membrane processes for water reuse. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1061–1070. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.113>
- Baía, A., Lopes, A., Nunes, M. J., Ciriaco, L., Pacheco, M. J., & Fernandes, A. (2022). Removal of Recalcitrant Compounds from Winery Wastewater by Electrochemical Oxidation. *Water (Switzerland)*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/w14050750>
- Bani-Melhem, K., Al-Kilani, M. R., & Tawalbeh, M. (2023). Evaluation of scrap metallic waste electrode materials for the application in electrocoagulation treatment of wastewater. *Chemosphere*, 310(July 2022), 136668. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136668>
- Bingul, Z., Irdemez, S., Yildiz, Y., & Demircioglu, N. (2022). Organic and inorganic matter removal from tannery wastewater using the electrocoagulation process. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), 2171–2180. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04144-5>
- Biswas, B., & Goel, S. (2022). Electrocoagulation and electrooxidation technologies for pesticide removal from water or wastewater: A review. *Chemosphere*, 302(April), 134709. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134709>
- Boinpally, S., Kolla, A., Kainthola, J., Kodali, R., & Vemuri, J. (2023). A state-of-the-art review of the electrocoagulation technology for wastewater treatment. *Water Cycle*, 4(December 2022), 26–36. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2023.01.001>
- Cao, Y., Malmali, M., Qian, X., & Wickramasinghe, S. R. (2022). Continuous electrocoagulation-membrane distillation unit for treating hydraulic fracturing produced water. *Journal of Water Process Engineering*, 50(May), 103219. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103219>

- Chen, R. F., Wu, L., Zhong, H. T., Liu, C. X., Qiao, W., & Wei, C. H. (2021). Evaluation of electrocoagulation process for high-strength swine wastewater pretreatment. *Separation and Purification Technology*, 272(April), 118900. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118900>
- Chen, Z., Wu, G., Wu, Y., Wu, Q., Shi, Q., Ngo, H. H., Vargas Saucedo, O. A., & Hu, H. Y. (2020). Water Eco-Nexus Cycle System (WaterEcoNet) as a key solution for water shortage and water environment problems in urban areas. *Water Cycle*, 1(April), 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.004>
- Chitra, D., & Muruganandam, L. (2019). Performance of Natural Coagulants on Greywater Treatment. *Recent Innovations in Chemical Engineering (Formerly Recent Patents on Chemical Engineering)*, 13(1), 81–92. <https://doi.org/10.2174/2405520412666190911142553>
- Das, P. P., Sharma, M., & Purkait, M. K. (2022). Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: A review. *Separation and Purification Technology*, 292(March), 121058. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121058>
- Dayarathne, H. N. P., Angove, M. J., Aryal, R., Abuel-Naga, H., & Mainali, B. (2021). Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*, 40(November), 101820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>
- Deepa, D., Keerthana, R., Pratheep Kumar, R., & Suryaprakash, R. (2022). Primary treatment of dairy wastewater using bio based natural coagualnts. *Materials Today: Proceedings*, 60, 616–621. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.125>
- Djerroud, N., Adjeroud, N., Felkai-Haddache, L., Hammoui, Y., Remini, H., Dahmoune, F., Merzouk, B., & Madani, K. (2018). Enhanced electrocoagulation–electroflotation for turbidity removal by *Opuntia ficus indica* cladode mucilage. *Water and Environment Journal*, 32(3), 321–332. <https://doi.org/10.1111/wej.12328>
- El-Naggar, M. A., Hassan, N. A., Nosier, S. A., Abdel-Aziz, M. H., Sedahmed, G. H., & Fathalla, A. S. (2022). Remediation of Wastewater Containing Insecticides by Electrocoagulation in a New Electrochemical Reactor. *Water, Air, and Soil Pollution*, 233(12). <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05998-8>
- Gali Aba Lulesa, T., Beyene, D., Ebba, M., & Kenea, G. (2022). Water Treatment Using Natural Coagulant and Electrocoagulation Process: A Comparison Study. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/4640927>
- Gautam, P., Kumar, S., Vishwakarma, S., & Gautam, A. (2022). Synergistic optimization of electrocoagulation process parameters using response surface methodology for treatment of hazardous waste landfill leachate. *Chemosphere*, 290(October 2021), 133255. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133255>
- Ghasemi, N., Gbeddy, G., Egodawatta, P., Zare, F., & Goonetilleke, A. (2020). Removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from wastewater using dual-mode ultrasound system. *Water and Environment Journal*, 34(S1), 425–434. <https://doi.org/10.1111/wej.12540>

- Guo, Z., Zhang, Y., Jia, H., Guo, J., Meng, X., & Wang, J. (2022). Electrochemical methods for landfill leachate treatment: A review on electrocoagulation and electrooxidation. *Science of the Total Environment*, 806, 150529. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150529>
- Hellal, M. S., Doma, H. S., & Abou-Taleb, E. M. (2023). Techno-economic evaluation of electrocoagulation for cattle slaughterhouse wastewater treatment using aluminum electrodes in batch and continuous experiment. *Sustainable Environment Research*, 33(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-023-00163-0>
- Hu, Y., Zhou, L., Zhu, J., & Gao, J. (2023). Efficient removal of polyamide particles from wastewater by electrocoagulation. *Journal of Water Process Engineering*, 51(December 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103417>
- Hugar, G. M., & Marol, C. K. (2020). Feasibility of electro coagulation using iron electrodes in treating paper industry wastewater. *Sustainable Water Resources Management*, 6(4). <https://doi.org/10.1007/s40899-020-00433-4>
- Hussain, G., & Haydar, S. (2021). Textile Effluent Treatment Using Natural Coagulant *Opuntia stricta* in Comparison with Alum. *Clean–Soil, Air, Water*, 49(10), 1–10. <https://doi.org/10.1002/clen.202000342>
- Igwegbe, C. A., Onukwuli, O. D., Ighalo, J. O., & Umembamalu, C. J. (2021). Electrocoagulation-flocculation of aquaculture effluent using hybrid iron and aluminium electrodes: A comparative study. *Chemical Engineering Journal Advances*, 6(March), 100107. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100107>
- Jaco, E., Gómez, W., Loroña, F., Zamora, N., & Huaman, N. (2022). *Las Aguas Residuales Grises Y Su Aplicación En Un Sistema Piloto*. 004, 157–171.
- Jafari, E., Malayeri, M. R., Brückner, H., & Krebs, P. (2023). Impact of operating parameters of electrocoagulation-flotation on the removal of turbidity from synthetic wastewater using aluminium electrodes. *Minerals Engineering*, 193(July 2022), 108007. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2023.108007>
- Jasim, B. A., Al-Furaiji, M. H., Sakran, A. I., & Abdullah, W. I. (2020). A competitive study using UV and ozone with H₂O₂ in treatment of oily wastewater. *Baghdad Science Journal*, 17(4), 1177–1182. <https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.4.1177>
- Kumar, D., & Sharma, C. (2022). Paper industry wastewater treatment by electrocoagulation and aspect of sludge management. *Journal of Cleaner Production*, 360(March), 131970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131970>
- Lourinho, G., & Brito, P. S. D. (2021). Electrolytic Treatment of Swine Wastewater: Recent Progress and Challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 12(2), 553–576. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00951-4>
- Lugo-Bueno, S. F., García-Morales, R., Coronel, R., Aguilar-Hernandez, I., Becerril-Bravo, J. E., Barrios-Perez, J. A., Mahlknecht, J., Cano-Quiroz, A., & Ornelas-Soto, N. (2022). Biocatalysis assisted by electrochemical processes for the removal of bisphenol A and tri-

- cloasan in wastewater. *Environmental Technology and Innovation*, 28, 102921. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102921>
- Malik, S. N., Khan, S. M., Ghosh, P. C., Vaidya, A. N., Kanade, G., & Mudliar, S. N. (2019). Treatment of pharmaceutical industrial wastewater by nano-catalyzed ozonation in a semi-batch reactor for improved biodegradability. *Science of the Total Environment*, 678, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.097>
- Mayyahi, A. Al, & Al-asadi, H. A. A. (2018). *Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Wastewater Treatment and Reuse : A Brief Review*. 2(3), 18–30.
- Mohamad, Z., Razak, A. A., Krishnan, S., Singh, L., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Treatment of palm oil mill effluent using electrocoagulation powered by direct photovoltaic solar system. *Chemical Engineering Research and Design*, 177, 578–582. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2021.11.019>
- Nasrullah, M., Ansar, S., Krishnan, S., Singh, L., Peera, S. G., & Zularisam, A. W. (2022). Electrocoagulation treatment of raw palm oil mill effluent: Optimization process using high current application. *Chemosphere*, 299(October 2021), 134387. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134387>
- Navas-Cárdenas, C., Rajendran, S., Ramírez, T., & Muñoz, F. (2022). Combined sedimentation, electrocoagulation and ozone processes for the wastewater treatment in an Ecuadorian MDF industry. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 11699–11710. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-03961-y>
- Nhut, H. T., Hung, N. T. Q., Lap, B. Q., Han, L. T. N., Tri, T. Q., Bang, N. H. K., Hiep, N. T., & Ky, N. M. (2021). Use of Moringa oleifera seeds powder as bio-coagulants for the surface water treatment. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 18(8), 2173–2180. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02935-2>
- Olabi, A. (2023). Ultrasound-assisted photo-Fenton process for treatment of pulp and paper mill wastewater and reduction of phytotoxicity. *Water and Environment Journal*, December 2022, 1–12. <https://doi.org/10.1111/wej.12841>
- Ozturk, A., Aygun, A., & Nas, B. (2019). Application of sequencing batch biofilm reactor (SBBR) in dairy wastewater treatment. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 36(2), 248–254. <https://doi.org/10.1007/s11814-018-0198-2>
- Pandis, P. K., Kalogirou, C., Kanellou, E., Vaitsis, C., Savvidou, M. G., Sourkouni, G., Zorpas, A. A., & Argiris, C. (2022). Key Points of Advanced Oxidation Processes (AOPs) for Wastewater, Organic Pollutants and Pharmaceutical Waste Treatment: A Mini Review. *ChemEngineering*, 6(1). <https://doi.org/10.3390/chemengineering6010008>
- Patel, R. K., Shankar, R., Khare, P., & Mondal, P. (2022). Treatment of sugar processing industry wastewater using copper electrode by electrocoagulation: Performance and economic study. *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(8), 100563. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100563>

- Pinto, C., Fernandes, A., Lopes, A., Nunes, M. J., Baía, A., Ciriaco, L., & Pacheco, M. J. (2022). Re-use of Textile Dyeing Wastewater Treated by Electrooxidation. *Water (Switzerland)*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/w14071084>
- Rodriguez Jimenez, D. M., & Gallego Suárez, D. D. J. (2019). Evaluación del quitosano como coagulante para el tratamiento de efluentes piscícolas. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 21(1), 6–17. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v21n1.73340>
- Rout, P. R., Zhang, T. C., Bhunia, P., & Surampalli, R. Y. (2021). Treatment technologies for emerging contaminants in wastewater treatment plants: A review. *Science of the Total Environment*, 753, 141990. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141990>
- Safwat, S. M., Mohamed, N. Y., & El-Seddik, M. M. (2023). Performance evaluation and life cycle assessment of electrocoagulation process for manganese removal from wastewater using titanium electrodes. *Journal of Environmental Management*, 328(December 2022), 116967. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116967>
- Sanni, I., Karimi Estahbanati, M. R., Carabin, A., & Drogui, P. (2022). Coupling electrocoagulation with electro-oxidation for COD and phosphorus removal from industrial container wash water. *Separation and Purification Technology*, 282(PA), 119992. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119992>
- Show, K. Y., Ling, M., Guo, H., & Lee, D. J. (2020). Laboratory and full-scale performances of integrated anaerobic granule-aerobic biofilm-activated sludge processes for high strength recalcitrant paint wastewater. *Bioresource Technology*, 310(March), 123376. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123376>
- Silva, J. R., Carvalho, F., Vicente, C., Santos, A. D., Quinta-Ferreira, R. M., & Castro, L. M. (2022). Electrocoagulation treatment of cork boiling wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107750>
- Silva, R., Santos, A. D., Silva, F., Mano, J. T., Vicente, C., & Castro, L. M. (2023). *Chemosphere Electrocoagulation treatment of furniture industry wastewater*. 328 (February). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138500>
- Song, P., Sun, C., Wang, J., Ai, S., Dong, S., Sun, J., & Sun, S. (2022). Efficient removal of Cu-EDTA complexes from wastewater by combined electrooxidation and electrocoagulation process: Performance and mechanism study. *Chemosphere*, 287(P1), 131971. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131971>
- Stylianou, M., Montel, E., Dermentzis, K., & Agapiou, A. (2020). Electrochemical Treatment of Cattle Wastewater Samples. *Waste and Biomass Valorization*, 11(10), 5185–5196. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01056-8>
- Tahreen, A., Jami, M. S., & Ali, F. (2020). Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. *Journal of Water Process Engineering*, 37(June), 101440. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>
- Toh, Y. P., Bashir, M. J. K., Guo, X., Wong, L. P., Ozturk, D., Amr, S. S. A., & Lim, J. W. (2023). Advanced treatment of poultry slaughterhouse wastewater using electrocoagulation and

- peroxidation: parametric analysis and process optimization. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04824-w>
- Trompette, J. L. (2022). On the specific limitations of titanium electrodes in the electrocoagulation process. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 648(May), 129196. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.129196>
- Ungureanu, N., Vladuț, V., Cristea, M., & Cujbescu, D. (2020). Wastewater electrooxidation using stainless steel electrodes. *E3S Web of Conferences*, 180, 1–11. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018003015>
- van Vliet, M. T. H., Jones, E. R., Flörke, M., Franssen, W. H. P., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. R. (2021). Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, 16(2). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>
- Xie, A., Ladner, D. A., & Popat, S. C. (2022). Electrocoagulation-electroflotation for primary treatment of animal rendering wastewater to enable recovery of fats. *Chemical Engineering Journal*, 431(P1), 133910. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133910>
- Yang, X., López-Grimau, V., Vilaseca, M., Crespi, M., Ribera-Pi, J., Calderer, M., & Martínez-Lladó, X. (2021). Reuse of textile wastewater treated by moving bed biofilm reactor coupled with membrane bioreactor. *Coloration Technology*, 137(5), 484–492. <https://doi.org/10.1111/cote.12543>
- 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(November 2021), 120439. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.120439>
- Yaqub, A., Raza, H., Ajab, H., Shah, S. H., Shad, A., & Bhatti, Z. A. (2023). Decolorization of Reactive Blue-2 Dye in Aqueous Solution by Electrocoagulation Process Using Aluminum and Steel Electrodes. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 9(September 2022), 100248. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100248>
- Yasasve, M., Manjusha, M., Manojj, D., Hariharan, N. M., Sai Preethi, P., Asaithambi, P., Karmegam, N., & Saravanan, M. (2022). Unravelling the emerging carcinogenic contaminants from industrial waste water for prospective remediation by electrocoagulation – A review. *Chemosphere*, 307(P3), 136017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136017>
- Yazici Guvenc, S., Varank, G., Can-Güven, E., Ercan, H., Yaman, D., Saricam, E., & Türk, O. K. (2022). Application of the hybrid electrocoagulation–electrooxidation process for the degradation of contaminants in acidified biodiesel wastewater. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 926(August), 0–2. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116933>
- Yildiz, S., & Olabi, A. (2021). Effect of Fe²⁺ and Fe⁰ Applied Photo-Fenton Processes on Sludge Disintegration. *Chemical Engineering and Technology*, 44(1), 95–103. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000269>

- Zainol, N. A., & Nasuha Mohd Fadli, N. (2020). Surface Water Treatment Using Tamarind Seed as Coagulants via Coagulation Process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 864(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012172>
- Zaldivar-Díaz, J. M., Martínez-Miranda, V., Castillo-Suárez, L. A., Linares-Hernández, I., Solache Ríos, M. J., & Alcántara-Valladolid, A. E. (2023). Synergistic electrocoagulation–precipitation process using magnesium electrodes for denim wastewater treatment: Bifunctional support electrolyte effect. *Journal of Water Process Engineering*, 51(November 2022). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103369>
- Zulzikrami Azner Abidin, C., Muhammad Ridwan, F., Haqi Ibrahim, A., Rosmady Rahmat, N., Farah Mohamed Hussein, N., & Ahmad, R. (2020). Electro-oxidation as Tertiary Treatment Techniques for Removal of Palm Oil Mill Effluent. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 864(1), 1–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012208>