

**Evaluación teórica de la electrocoagulación como alternativa sostenible para el tratamiento
de efluentes en la producción de snacks en Colombia**

Elaborado por:

Diana Carolina Villota Guerrero

Julieth Stefania Castañeda Pedraza

Universidad Ean

Proyecto de Investigación de Gerencia en procesos e innovación

Bogotá, 2025

RESUMEN

El presente proyecto de grado se enfoca en la evaluación teórica de la electrocoagulación como una alternativa sostenible para el tratamiento de efluentes generados en la industria de producción de snacks en Colombia. Esta tecnología, basada en la aplicación de corriente eléctrica para la remoción de contaminantes, ha demostrado ser eficiente, adaptable y con menor impacto ambiental en comparación con los métodos tradicionales como la coagulación química y los biorreactores de membrana.

La metodología empleada se basa en una revisión bibliográfica sistemática de estudios científicos y técnicos entre 2005 y 2024, complementada con entrevistas a expertos del sector. Se analizaron parámetros clave como eficiencia de remoción de DQO, DBO y SST, costos operativos, generación de residuos y viabilidad técnica. Además, se construyeron matrices comparativas y se evaluaron aspectos normativos y de sostenibilidad ambiental.

Los resultados obtenidos evidencian que la electrocoagulación presenta eficiencias superiores al 90% en la remoción de contaminantes críticos, con costos operativos competitivos y menor generación de lodos tóxicos. Asimismo, se identificaron barreras para su adopción en Colombia, principalmente relacionadas con el desconocimiento técnico, los costos de inversión inicial y la falta de incentivos regulatorios. No obstante, se concluye que su implementación puede representar una solución viable, especialmente en el marco de estrategias de producción limpia y cumplimiento de la normativa ambiental vigente.

Palabras clave: Electrocoagulación, tratamiento de aguas residuales, industria alimentaria, sostenibilidad, viabilidad tecnológica, Colombia.

Abstract

This degree project focuses on the theoretical evaluation of electrocoagulation as a sustainable alternative for the treatment of wastewater generated in the snack production industry in Colombia. This technology, which involves the application of electric current to remove contaminants, has proven to be efficient, adaptable, and environmentally friendly compared to conventional methods such as chemical coagulation and membrane bioreactors.

The methodology employed is based on a systematic literature review of scientific and technical studies published between 2005 and 2024, complemented by interviews with industry experts. Key parameters such as removal efficiency for COD, BOD, and TSS, operational costs, sludge generation, and technical feasibility were analyzed. Comparative matrices were developed, and regulatory and environmental sustainability aspects were assessed.

The results show that electrocoagulation achieves removal efficiencies exceeding 90% for critical pollutants, with competitive operational costs and lower production of toxic sludge. Barriers to adoption in Colombia were identified, primarily related to limited technical awareness, high initial investment costs, and lack of regulatory incentives. Nonetheless, the study concludes that the implementation of this technology is a viable solution, especially within the framework of clean production strategies and compliance with current environmental regulations.

Keywords: Electrocoagulation, wastewater treatment, food industry, sustainability, technological feasibility, Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

1.INTRODUCCIÓN	7
2.PLANTEAMIENTO PROBLEMA	9
3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN	10
3.1 OBJETIVO GENERAL	10
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
4.JUSTIFICACIÓN	11
5.ANTECEDENTES	12
6.MARCO CONCEPTUAL	17
6.1 Tecnologías usadas para el tratamiento de aguas residuales	19
6.2 Tratamiento Primario	19
6.3 Tratamiento Secundario	21
6.5 Tecnologías Emergentes en el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria Alimentaria	23
6.6 Aplicación de la Electrocoagulación en la Industria Alimentaria	28
6.7 Sostenibilidad de la Electrocoagulación en la Industria de Snacks	29
7.METODOLOGÍA	31
7.1 Fase 1: Revisión de literatura y selección de fuentes	31
7.2 Fase 2: Análisis de eficiencia Técnica de la Electrocoagulación	33
7.3 Fase 3: Evaluación de Viabilidad Técnica, Ambiental y Económica	34
7.4 Fase 4: Elaboración de Conclusiones y Recomendaciones	36
8. INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	37
8.1 Instrumentos de análisis	37
8.2 Matriz de evaluación de parámetros	37
8.3 Entrevistas a Expertos y Validación	38
9. CONCLUSIÓN	44
10.OBSERVACIONES	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales y las eficiencias de remoción de DQO , DBO y SST que se reportan en la industria alimentaria.....	16
Tabla 2 Matriz de revisión bibliográfica.....	32
Tabla 3 Cuatro actividades relacionadas al desempeño técnico de la electrocoagulación.....	33
Tabla 4 Comparativa de Remoción de Contaminantes (%).....	34
Tabla 5 Actividades para realizar conclusiones y recomendaciones.	36
Tabla 6 Matriz comparativa de parámetros de electrocoagulación.....	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Tratamiento de aguas residuales en la industria alimentaria	17
Figura 2 Instrumento análisis FODA para analizar viabilidad de electrocuagulación.....	38

1.INTRODUCCIÓN

La industria de alimentos procesados representa uno de los sectores más dinámicos de la economía colombiana, con un crecimiento sostenido en la producción y el consumo de snacks. Sin embargo, este desarrollo ha traído consigo importantes retos ambientales, especialmente en la gestión de aguas residuales con alta carga orgánica e inorgánica. Estos efluentes, si no se tratan adecuadamente, pueden generar impactos negativos significativos en los cuerpos de agua receptores, afectando la biodiversidad, la salud pública y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente, como lo establece la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Las empresas han recurrido a tecnologías como la coagulación química, la adsorción con carbón activado o los procesos de oxidación avanzada para tratar sus vertimientos. No obstante, estas tecnologías presentan limitaciones asociadas a sus altos costos operativos, la generación de residuos secundarios y la necesidad de productos químicos que incrementan el impacto ambiental. Frente a este panorama, la electrocoagulación (EC) ha emergido como una alternativa innovadora y sostenible para el tratamiento de aguas residuales industriales. Su principio se basa en la aplicación de corriente eléctrica a través de electrodos metálicos, que generan coagulantes in situ capaces de aglutinar y remover una amplia gama de contaminantes.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar teóricamente la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar la electrocoagulación en la industria de snacks en Colombia. Para ello, se realiza una revisión exhaustiva de literatura científica, se construyen matrices comparativas de eficiencia tecnológica y se incorpora el análisis de expertos del sector.

Este enfoque permite identificar no solo el potencial de esta tecnología, sino también las barreras y oportunidades para su adopción en el contexto colombiano.

2. PLANTEAMIENTO PROBLEMA

La industria de alimentos procesados, en particular las empresas dedicadas a la producción de snacks han demostrado generar un gran impacto ambiental debido a las aguas residuales con alta carga de materia orgánica e inorgánica. Estos efluentes si no son tratados de manera adecuada, pueden generar impactos ambientales negativos, afectando a la biodiversidad local y la calidad de las fuentes hídricas. En Colombia, las empresas están obligadas a implementar soluciones efectivas para el tratamiento de aguas residuales, conforme a las normativas ambientales vigentes. (*Resolución 1256 de 2021*, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Los tratamientos convencionales utilizados en la remoción de contaminantes, como la coagulación química, adsorción de carbón activado y oxidación avanzada, presentan altos costos operativos, generación de residuos secundarios y formación de subproductos tóxicos (Kobyas, M., Hiz, H, 2006). Además, las alternativas de procesos físico- químicos pueden fragmentar los contaminantes en compuestos más pequeños, lo que dificulta aún más su eliminación (Acosta, Abril & López, 2013).

Ante estos desafíos, la electrocoagulación (EC) ha emergido como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas residuales industriales. Este proceso emplea corriente eléctrica para desestabilizar y aglutinar contaminantes, facilitando su posterior eliminación. Diversos estudios han demostrado la eficacia de la EC en la remoción de contaminantes en efluentes de diferentes sectores de la industria alimentaria, destacándose por su eficiencia, menor generación de residuos y menor impacto ambiental en comparación con métodos tradicionales (Hanna Instruments, 2020).

3. OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad del uso de la electrocoagulación en el tratamiento de efluentes generados en la producción de Snacks en Colombia.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar teóricamente el desempeño de la electrocoagulación en la remoción de partículas presentes en los efluentes de la producción de snacks, a partir de una revisión bibliográfica.
2. Evaluar la viabilidad técnica, ambiental y económica de la implementación industrial de la electrocoagulación en la industria de snacks en Colombia, identificando sus beneficios y desafíos.

4.JUSTIFICACIÓN

Los efluentes derivados de los alimentos procesados contienen altas cargas de materia orgánica e inorgánica, lo que representa un desafío significativo para la preservación de los recursos hídricos y la biodiversidad local. Ante este panorama, el cumplimiento de la normativa ambiental, como la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, exige a las empresas implementar soluciones efectivas para el tratamiento de aguas residuales. Sin embargo, los métodos convencionales, como la coagulación química y la adsorción de carbón activado, presentan limitaciones en términos de costos operativos, generación de residuos secundarios y formación de subproductos tóxicos.

En este contexto, la electrocoagulación (EC) emerge como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas residuales industriales. Este proceso, que utiliza corriente eléctrica para desestabilizar y aglutinar contaminantes, ha demostrado ser eficiente, económico y ambientalmente sostenible en comparación con los métodos tradicionales. Por lo tanto, evaluar la viabilidad de la electrocoagulación en el contexto colombiano no solo contribuirá al cumplimiento de las normativas ambientales, sino que también permitirá identificar sus beneficios económicos y ambientales, como la reducción de costos operativos y la minimización de residuos secundarios. Además, su implementación podría optimizar el tratamiento de aguas residuales, fomentando la sostenibilidad del sector de snacks.

Desde un enfoque metodológico, este estudio se basa en una revisión bibliográfica exhaustiva que consolidará información técnica y científica sobre la electrocoagulación aplicada a la industria alimentaria.

5. ANTECEDENTES

La industria de alimentos procesados, en especial la producción de snacks, ha experimentado un crecimiento sin precedentes en Colombia, representando el 8% del PIB manufacturero y registrando un aumento anual del 5% en la última década, según la Federación Nacional de Productores de Snacks (2022). Sin embargo, este auge ha generado un desafío ambiental crítico: la gestión de aguas residuales con cargas contaminantes hasta 10 veces superiores a las domésticas, caracterizadas por concentraciones de DQO (Demanda Química de Oxígeno) entre 2,000 y 10,000 mg/L, dependiendo de procesos como el lavado, la cocción o la conservación de alimentos (Asgharnejad et al., 2021).

Históricamente, los métodos de tratamiento en la industria alimentaria evolucionaron desde técnicas básicas como la sedimentación y la coagulación química (ampliamente usadas entre los años 60 y 80) hasta tecnologías más sofisticadas como los biorreactores de membrana (MBR) en los 90. No obstante, estas soluciones enfrentan limitaciones: la coagulación química, aún empleada en el 70% de las plantas colombianas, genera lodos tóxicos con costos de disposición que superan los \$500 millones de COP anuales para una planta mediana (Martínez & López, 2019), mientras que los MBR son altamente eficientes en la remoción de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno), alcanzando niveles de eliminación del 95% al 98% dependiendo de la configuración y condiciones del sistema (Oro azul, 2020), entre 3 a 5 kWh/m³, lo que los vuelve inviables para PYMES.

La implementación de normativas como la Resolución 1256 de 2021, que establece límites máximos de 500 mg/L para Demanda Química de Oxígeno y 200 mg/L para Sólidos Suspendidos

Totales en descargas, ha exacerbado la presión sobre el sector. Según el Ministerio de Ambiente (2021), el 80% de las empresas de snacks incumplen estos parámetros, lo que ha derivado en multas millonarias, como el caso de Empack S.A. en Antioquia, sancionada con 1,200 millones en 2020. Esta empresa, tras adoptar un sistema piloto de electrocoagulación (EC), logró reducir su DQO en un 89,300 millones anuales (Informe de sostenibilidad Empack, 2023).

La Electrocoagulación (EC), desarrollada en los años 70, es una tecnología que utiliza electrodos de aluminio o hierro que, según diversos estudios, opera aplicando una corriente eléctrica en un rango de entre 20 y 40 V, lo que provoca la liberación de iones metálicos que actúan como agentes coagulantes, facilitando la eliminación de contaminantes en aguas residuales. Su eficacia ha sido ampliamente validada a nivel mundial. Por ejemplo, en Nueva Zelanda, la industria láctea logró un 94% de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) con costos operativos de solo 0.15 USD/m³, significativamente menores en comparación con la coagulación química, que alcanza los 0.50 USD/m³ (Hanna Instruments, 2020). De manera similar, en Brasil, la empresa NutriSnacks implementó un sistema combinado de EC con oxidación avanzada, logrando una eficiencia del 97% y reduciendo su huella de carbono en un 40% (Silva et al., 2022).

A pesar de los resultados prometedores de la CE, su implementación en Colombia ha sido limitada. Según la Cámara de Alimentos (2023), solo el 15% de las empresas de snacks han adoptado tecnologías innovadoras. Un estudio de la Universidad Nacional identificó varias barreras que dificultan su aplicación, en comparación con métodos tradicionales como la coagulación química y la oxidación avanzada. La coagulación química ha sido una alternativa ampliamente utilizada debido a su facilidad de implementación y menores costos de inversión inicial. Sin embargo, presenta desventajas significativas, como los altos costos operativos

derivados de la compra constante de productos químicos y la generación de grandes volúmenes de lodos tóxicos, lo que aumenta los costos de disposición y manejo. Además, el uso de agentes coagulantes como el sulfato de aluminio o los cloruros férricos puede alterar el pH del agua, requiriendo tratamientos adicionales para su neutralización (Tech, 2019).

Otra tecnología utilizada en el tratamiento de aguas residuales es la oxidación avanzada, que emplea procesos como la ozonización, el peróxido de hidrógeno y la fotocatalisis. Este método es altamente eficiente en la degradación de compuestos orgánicos recalcitrantes y microorganismos, además de no generar lodos adicionales. Ahora bien, su implementación implica altos costos de operación debido al consumo energético y la necesidad de equipos especializados, además de que un control inadecuado puede generar subproductos tóxicos (Oxidación Avanzada en Aguas Residuales: El Proceso Clave para un Tratamiento Ecológico y Eficaz, 2024).

Si bien la EC representa una alternativa sostenible y eficiente, su adopción en Colombia se ha visto limitada por barreras económicas, falta de conocimiento técnico y resistencia al cambio en la industria. La comparación con otros métodos evidencia que no existe una única solución ideal, sino que la elección del tratamiento depende de factores como la disponibilidad de recursos, el tipo de contaminantes a tratar y la viabilidad económica para cada empresa.

Además, su eficacia depende de la composición del agua residual, lo que requiere ajustes constantes en el voltaje y tipo de electrodo. Otro factor a considerar es el consumo energético, que puede representar costos adicionales si la fuente de electricidad no proviene de recursos renovables. Para fomentar el uso de tecnologías innovadoras, es necesario implementar incentivos gubernamentales, generar mayor acceso a financiamiento para la inversión inicial y desarrollar

programas de capacitación que faciliten la transición hacia procesos más sostenibles y eficientes en el sector industrial.

Como se observa en la Tabla 1 hay una comparación de diferentes tecnologías de tratamiento en términos de su eficiencia en la remoción de DQO (Demanda Química de Oxígeno), DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) y SST (Sólidos Suspendedos Totales). Por ejemplo, métodos como la ósmosis inversa y los procesos fisicoquímicos y biológicos combinados muestran eficiencias destacadas, alcanzando hasta un 99% en la remoción de SST y un 97% en DBO. Sin embargo, estas tecnologías pueden presentar limitaciones en términos de costos operativos y generación de residuos secundarios. Entre las alternativas analizadas, la electrocoagulación emerge como una opción prometedora debido a su alta eficiencia en la remoción de contaminantes, con un 92% en la eliminación de DQO, y su menor generación de residuos secundarios en comparación con métodos convencionales como la coagulación química o los tratamientos biológicos. Aunque no se reportan datos específicos para DBO y SST en la tabla, estudios complementarios respaldan su potencial para tratar efluente complejos, como los generados en la producción de snacks.

Tabla 1 Las tecnologías de tratamiento de aguas residuales y las eficiencias de remoción de DQO , DBO y SST que se reportan en la industria alimentaria.

Wastewater treatment technologies and the removal efficiencies of COD, BOD and TSS are reported in the food industry.

Method	COD Removal (%)	BOD Removal (%)	TSS Removal (%)	References
Combined physiochemical and biological	87	92	97	Pavón-Silva et al. (2009)
Reverse osmosis	95	97	99	Vourch et al. (2008)
Electrochemical	92	-	-	Varank et al. (2018)
Chemical oxidation and electro-oxidation	98	-	-	Tiwari and Sahu (2017)
Microbial fuel cells	80-90	-	-	Cecconet et al. (2018)
Dissolved air floatation	87.5	-	97.8	Dos Santos Pereira et al. (2018)
Micro/ultra/nano filtration	60	-	-	Ochando-Pulido and Martínez-Pérez (2018)
Photocatalytic degradation	91.7	-	-	Garg and Joshi (2014)
Proteins and lipids recovery	-	73	-	Kurup et al. (2019)
Nutrient recovery	64.7	-	-	Wang et al. (2020)

Fuente. Adaptado de ([Shrivastava et al., 2022](#))

En términos generales, los estudios revisados evidencian que las tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales, aunque ampliamente utilizadas, presentan limitaciones significativas en términos de costos, generación de residuos secundarios y eficiencia. Por otro lado, tecnologías emergentes como la electrocoagulación han demostrado ser prometedoras debido a su alta eficiencia en la remoción de contaminantes y su menor impacto ambiental. No obstante, persiste una brecha en la investigación sobre su aplicación en la industria de snacks en Colombia, donde estudios específicos que evalúan su viabilidad técnica, económica y ambiental son aún limitados.

6. MARCO CONCEPTUAL

Las aguas residuales son efluentes líquidos generados como resultado de actividades domésticas, industriales, agrícolas y comerciales. Estos efluentes contienen una amplia variedad de contaminantes que pueden clasificarse en físicos, químicos y biológicos, dependiendo de su origen y composición (Metcalf & Eddy, 2014). Entre estos contaminantes se encuentran la materia orgánica, nutrientes, metales pesados, microorganismos patógenos y diversos compuestos químicos, los cuales, en concentraciones elevadas, representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente si no son tratados adecuadamente.

Figura 1 Tratamiento de aguas residuales en la industria alimentaria



Fuente. Fotografía de (Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Alimentaria: Un Compromiso con la Salud y el Medio Ambiente, 2024)

En términos de origen, las aguas residuales se pueden clasificar en tres grandes categorías:

1. **Aguas residuales domésticas:** Proviene de hogares, instituciones y servicios públicos, y su composición está dominada por materia orgánica biodegradable, detergentes y microorganismos. Este tipo de efluente generalmente requiere tratamientos biológicos para su adecuada depuración.

2. **Aguas residuales industriales:** Generadas a partir de procesos productivos en la industria, su composición varía ampliamente según el sector. Pueden contener sustancias tóxicas, metales pesados y compuestos químicos complejos, lo que exige el uso de tecnologías de tratamiento más avanzadas para garantizar su neutralización y evitar impactos ambientales.
3. **Aguas residuales agrícolas:** Estas aguas son resultado de actividades como el riego, la aplicación de fertilizantes y pesticidas, y la cría de animales. Suelen presentar altas concentraciones de nutrientes (especialmente nitrógeno y fósforo) y productos químicos, lo que puede desencadenar fenómenos de eutrofización en cuerpos de agua receptores. En el contexto de la industria alimentaria, y específicamente en la producción de snacks, las aguas residuales se caracterizan por una alta carga orgánica. Esto se debe a la presencia de residuos de aceites, grasas, carbohidratos, proteínas y aditivos químicos empleados en el procesamiento de alimentos. La caracterización adecuada de estas aguas implica el análisis de diversas propiedades:
 - **Propiedades físicas:** Se evalúan parámetros como el color, olor, turbidez, temperatura y la cantidad de sólidos en suspensión, ya que estos pueden influir en la eficiencia de los procesos de tratamiento.
 - **Propiedades químicas:** Entre los indicadores más importantes se encuentran el pH, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), que reflejan la carga orgánica del agua. Además, se miden los niveles de nutrientes (nitrógeno y fósforo), metales pesados y compuestos orgánicos persistentes.

- **Propiedades biológicas:** Se determina la presencia de microorganismos patógenos, incluyendo bacterias, virus y parásitos, que pueden afectar la salud pública si las aguas residuales no se tratan correctamente.

El impacto de las descargas industriales sin tratamiento adecuado es considerable, pues deteriora la calidad de los cuerpos de agua, afecta la biodiversidad y puede provocar brotes de enfermedades. Estudios recientes señalan que la liberación de aguas residuales no tratadas contribuye significativamente a la degradación de los ecosistemas acuáticos, especialmente en países en desarrollo (OMS, 2022).

6.1 Tecnologías usadas para el tratamiento de aguas residuales

La industria alimentaria es una de las mayores generadoras de aguas residuales con alta carga orgánica, grasas, aceites y sólidos suspendidos, lo que requiere sistemas de tratamiento adecuados para garantizar la protección del medio ambiente y el cumplimiento de la normativa (Poyatos et al., 2010). Generalmente, estos tratamientos se dividen en tratamientos primarios, secundarios y terciarios, cada uno con un enfoque particular en la eliminación de contaminantes.

6.2 Tratamiento Primario

El tratamiento primario es la primera barrera física para la remoción de contaminantes gruesos en el agua residual. En la industria alimentaria, este tratamiento es especialmente importante porque reduce la carga de sólidos, aceites y grasas, evitando su ingreso a etapas más sensibles del tratamiento.

Procesos principales:

- **Rejas y tamices:** Se utilizan para interceptar sólidos grandes como restos vegetales, plásticos o trozos de materia prima que pueden obstruir equipos posteriores (Metcalf & Eddy, 2014).
- **Desarenadores:** Permiten la sedimentación de partículas pesadas como arenas o fragmentos de hueso, que podrían dañar bombas o sistemas mecánicos.
- **Tanques de sedimentación o clarificadores:** El agua se mantiene en reposo, permitiendo que los sólidos más densos decanten al fondo como lodos primarios. Este proceso reduce significativamente la carga de sólidos suspendidos.
- **Separadores de grasa o trampas de aceite:** En la industria alimentaria, especialmente en la producción de snacks, lácteos o carnes, es crucial remover grasas y aceites que pueden interferir con procesos biológicos posteriores.
- **Flotación por aire disuelto (DAF):** En esta técnica se inyectan microburbujas de aire que se adhieren a partículas finas, aceites o grasas, haciéndolas flotar a la superficie para su posterior remoción.

Este tipo de tratamiento puede reducir entre un 40-60% de sólidos suspendidos y hasta un 30-35% de DBO, pero no es suficiente para eliminar compuestos disueltos o microorganismos (McGraw, H., 2014).

6.3 Tratamiento Secundario

El tratamiento secundario se centra en la degradación biológica de la materia orgánica disuelta y coloidal, lo cual es esencial en aguas residuales por su alto contenido de DBO y DQO.

Tecnologías más comunes:

- **Lodos activados (aeróbicos):** Es uno de los métodos más usados. Consiste en un reactor biológico donde las bacterias se alimentan de la materia orgánica bajo condiciones de oxigenación continua. El crecimiento bacteriano forma flóculos que luego se separan en un clarificador. Tiene una eficiencia de remoción de 85-95% de DBO (Metcalf & Eddy, 2014).
- **Reactores anaerobios (UASB y EGSB):** En estos sistemas no se requiere oxígeno. Los microorganismos descomponen la materia orgánica y generan biogás (metano y CO₂), útil como fuente de energía. Es ideal para efluentes con alta carga orgánica, como los provenientes de industrias de bebidas o fermentación (Sawayama, S., Tsukahara, K., Yagishita, T., & Hanada, S., 2001).
- **Filtros percoladores (o biofiltros):** El agua se rocía sobre un medio poroso (piedras o plástico), sobre el cual se forma una biopelícula que degrada la materia orgánica. Es eficaz en industrias pequeñas o cuando se busca un sistema de bajo mantenimiento.
- **Lagunas de estabilización:** Grandes estanques donde el tratamiento ocurre de forma natural por acción de bacterias, algas y el sol. Son sistemas de bajo costo y fáciles de operar, usados en zonas rurales o donde se dispone de espacio.

Este tratamiento logra una reducción sustancial de materia orgánica y sólidos suspendidos, pero no elimina nutrientes como nitrógeno y fósforo, ni compuestos tóxicos específicos, lo que da paso al tratamiento terciario.

6.4 Tratamiento Terciario o Avanzado

El tratamiento terciario se aplica cuando se requiere una calidad superior del agua tratada, ya sea para reutilización o vertido en cuerpos receptores sensibles (lagos, ríos de reserva ecológica, etc.). Procesos empleados:

- **Filtración avanzada:** El uso de filtros de arena, carbón activado o membranas ayuda a remover partículas finas, compuestos orgánicos y contaminantes residuales. Es ideal para efluentes con colores, sabores u olores no deseados.
- **Remoción de nutrientes (N y P):** El exceso de nutrientes en el efluente puede causar eutrofización. Para eliminarlos, se aplican:
 - Procesos biológicos (como la nitrificación-desnitrificación).
 - Procesos químicos, como la precipitación del fósforo con sales de aluminio o hierro.
- **Desinfección:**
 - **Cloración:** Método tradicional, aunque puede generar subproductos tóxicos.
 - **Radiación UV:** Eficaz para destruir el ADN de patógenos sin generar residuos.
 - **Ozonización:** Poderoso oxidante que elimina microorganismos y compuestos orgánicos persistentes.
- **Ósmosis inversa y nanofiltración:** Estos procesos de membrana permiten la eliminación de sales, virus, metales pesados y microcontaminantes, por lo que son empleados para la

reutilización del agua tratada en procesos industriales o incluso en riego (McGraw,H., 2014).

Este tratamiento puede lograr una calidad de agua que cumple con estándares internacionales de reutilización y descarga.

6.5 Tecnologías Emergentes en el Tratamiento de Aguas Residuales de la Industria

Alimentaria

Con el objetivo de mejorar la eficiencia del tratamiento, reducir el consumo energético, aumentar la sostenibilidad y adaptarse a normativas más exigentes, han surgido diversas tecnologías emergentes. Estas son especialmente relevantes para la industria alimentaria, donde la composición del efluente puede ser compleja y altamente variable.

Biorreactores de Membrana (MBR)

Los biorreactores de membrana (MBR) son sistemas híbridos que combinan un reactor biológico aeróbico con una unidad de separación por membrana, permitiendo realizar simultáneamente el tratamiento biológico y la clarificación del agua residual. Esta tecnología ha cobrado gran relevancia en el tratamiento de efluentes industriales, incluidos los generados por la industria alimentaria, debido a su capacidad para operar con altos niveles de biomasa y obtener un efluente de excelente calidad. El sistema permite retener microorganismos y sólidos suspendidos mediante membranas de micro o ultrafiltración, lo que evita el uso de decantadores secundarios tradicionales y mejora la eficiencia del proceso (Judd, 2006).

En la industria de alimentos los MBR se utilizan para tratar efluentes con elevada carga orgánica, alta demanda bioquímica de oxígeno (DBO), grasas, aceites, proteínas y carbohidratos,

componentes comunes en plantas procesadoras de lácteos, cárnicos, bebidas y snacks. La separación por membrana posibilita mantener una alta concentración de sólidos en el bioreactor, lo que favorece una mayor tasa de degradación de la materia orgánica y una menor producción de lodos excedentes (Le-Clech et al., 2006). Además, el sistema puede adaptarse a variaciones en el flujo y la carga contaminante, lo cual es habitual en esta industria debido a las variaciones estacionales o los diferentes ciclos de producción. Estudios han demostrado que los MBR pueden alcanzar eficiencias de remoción de DBO y DQO superiores al 95%, así como una retención casi completa de microorganismos patógenos, lo que hace viable la reutilización del agua tratada para ciertos fines industriales (Haradhan K., Vijay K., Chun-Won K, 2022).

El uso de biorreactores de membrana también se ha explorado como parte de esquemas de tratamiento integrados, combinados con procesos anaerobios o tecnologías de oxidación avanzada, con el objetivo de mejorar aún más la calidad del efluente. En particular, en el tratamiento de efluentes con alta carga grasa ,como los generados por procesos de fritura y limpieza en plantas de snacks, los MBR han demostrado una excelente capacidad para adaptarse a condiciones adversas, siempre que se realice un pretratamiento adecuado para evitar la obstrucción de membranas. Así, los MBR constituyen una tecnología consolidada y en constante evolución para el tratamiento de aguas residuales de alta complejidad en el sector alimentario.

Nanotecnología Aplicada al Tratamiento de Aguas

La nanotecnología aplicada al tratamiento de aguas residuales ha emergido como una solución de vanguardia para enfrentar contaminantes difíciles de eliminar mediante tecnologías convencionales. Su principio radica en el uso de materiales con dimensiones nanométricas (1-100 nm) que presentan propiedades fisicoquímicas únicas, como alta reactividad superficial, mayor capacidad de adsorción y potencial catalítico. En el contexto de la industria alimentaria, donde los efluentes pueden contener compuestos orgánicos persistentes, colorantes, aceites, pesticidas o incluso antibióticos (especialmente en instalaciones de producción animal o láctea), la nanotecnología ofrece una vía eficiente para la remoción de estos contaminantes (Qu et al., 2013).

Entre los nanomateriales más destacados se encuentran las nanopartículas de óxidos metálicos (como TiO_2 y ZnO), que pueden actuar como fotocatalizadores bajo radiación UV, generando radicales libres capaces de oxidar completamente moléculas orgánicas. Este proceso es especialmente útil para degradar compuestos recalcitrantes que no son removidos eficientemente por tratamientos biológicos convencionales. Asimismo, las nanopartículas de hierro cero valente (nZVI) se han utilizado con éxito para la reducción de metales pesados y contaminantes halogenados en efluentes industriales. Por su parte, los nanotubos de carbono han demostrado gran eficiencia como materiales adsorbentes para la remoción de fenoles, grasas y residuos químicos presentes en el agua residual de la industria alimentaria (Savage & Diallo, 2005).

La nanotecnología también ha sido integrada en membranas compuestas, en las cuales se incorporan nanomateriales que mejoran la resistencia al ensuciamiento, aumentan la

permeabilidad y proporcionan propiedades antibacterianas, prolongando la vida útil de los sistemas de filtración. Además, se está explorando el desarrollo de sensores basados en nanotecnología para la detección en tiempo real de contaminantes específicos en el agua tratada, lo cual representa un avance en el monitoreo y control de la calidad del efluente. El avance de esta tecnología representa una promesa para el tratamiento avanzado y sostenible de aguas residuales en sectores industriales con altos requerimientos de calidad y eficiencia, como el alimentario.

Fitorremediación

Es una técnica de tratamiento basada en el uso de plantas acuáticas o terrestres para absorber, transformar o inmovilizar contaminantes presentes en aguas residuales, suelos o sedimentos. Esta estrategia, que puede implementarse en sistemas como humedales construidos, flotantes o de flujo subsuperficial, ha sido ampliamente reconocida como una opción ecológica y económica para la remediación de ambientes contaminados. En la industria alimentaria, donde los efluentes suelen contener grandes cantidades de nutrientes (nitrógeno y fósforo), materia orgánica, metales y compuestos fenólicos, la fitorremediación ofrece una alternativa eficaz, especialmente para plantas de tratamiento de baja a mediana escala ubicadas en zonas rurales o periurbanas (Salt et al., 1998).

Especies como *Phragmites australis* (carrizo), *Typha latifolia* (enea) y *Eichhornia crassipes* (jacinto de agua) han sido empleadas con éxito para remover DBO, nutrientes y metales pesados de aguas residuales industriales. Estas plantas no solo absorben nutrientes y contaminantes a través de sus raíces, sino que también favorecen procesos microbiológicos que ocurren en la rizosfera, potenciando la degradación de compuestos orgánicos mediante

comunidades bacterianas asociadas. En estudios realizados en humedales construidos para tratar efluentes de procesadoras de jugos y productos lácteos, se ha demostrado que la fitorremediación puede reducir significativamente los niveles de DBO (hasta un 85%) y fósforo total, además de mejorar la calidad estética del agua tratada (Zhao et al., 2012).

Además del tratamiento del agua, los sistemas de fitorremediación pueden integrarse como parte de estrategias de economía circular, ya que las plantas utilizadas pueden aprovecharse posteriormente como biomasa para generación de energía, compostaje o incluso producción de biocombustibles. Esto añade un valor adicional al proceso, cerrando el ciclo de nutrientes y contribuyendo a la sostenibilidad de la industria. A pesar de que los tiempos de tratamiento suelen ser mayores que en tecnologías intensivas, su bajo costo de operación, su capacidad para integrarse al paisaje y su impacto positivo en la biodiversidad local convierten a la fitorremediación en una opción válida y cada vez más adoptada en entornos agroindustriales comprometidos con el desarrollo sostenible.

Electrocoagulación (EC)

La electrocoagulación (EC) es un proceso electroquímico avanzado utilizado para la remoción de diversos contaminantes del agua, incluyendo materia orgánica, metales pesados, aceites, grasas y sólidos suspendidos. Su principio se basa en la generación in situ de coagulantes metálicos mediante la electrólisis de electrodos, generalmente de aluminio o hierro, que al ser sometidos a una corriente eléctrica, liberan iones metálicos al agua (Mollah et al., 2001). Estos iones se combinan con los contaminantes presentes, promoviendo la formación de flóculos que pueden ser posteriormente separados mediante sedimentación, flotación o filtración. A diferencia de la coagulación química tradicional, la EC no requiere la dosificación externa de productos

químicos, lo que disminuye significativamente la generación de lodos químicos secundarios y facilita su gestión (Khandegar & Saroha, 2013).

El mecanismo fundamental de la electrocoagulación se sustenta en tres etapas principales: (1) la disolución electrolítica del ánodo para liberar iones metálicos coagulantes, (2) la formación de hidróxidos metálicos que actúan como agentes desestabilizadores de partículas coloidales, y (3) la agregación de contaminantes y formación de flóculos que son eliminados del agua por medios físicos. La eficiencia del proceso está influenciada por varios factores operativos, incluyendo el tipo de electrodo, la densidad de corriente aplicada, el pH de la solución, el tiempo de tratamiento, y la conductividad del agua (Holt et al., 2005). Estos parámetros deben ser cuidadosamente optimizados según las características del efluente y los objetivos del tratamiento.

6.6 Aplicación de la Electrocoagulación en la Industria Alimentaria

La industria alimentaria genera aguas residuales con una carga significativa de materia orgánica, grasas, aceites, detergentes y otros compuestos que deben ser tratados adecuadamente antes de su disposición o reutilización. En este contexto, la electrocoagulación ha sido aplicada con éxito para la depuración de efluentes provenientes de industrias lácteas, cárnicas, de bebidas y procesamiento vegetal, demostrando una alta eficacia en la remoción de DBO, DQO y turbidez (Emamjomeh & Sivakumar, 2009).

En la industria de snacks, el origen de las aguas residuales está principalmente relacionado con operaciones como el lavado de tubérculos, la cocción y especialmente la fritura de productos, donde se produce una gran acumulación de almidones, grasas saturadas, compuestos fenólicos y residuos orgánicos. Estos contaminantes dificultan el tratamiento biológico convencional, lo que hace de la electrocoagulación una alternativa atractiva. Estudios

han mostrado que la EC puede remover eficientemente hasta un 95% de aceites y grasas y más del 90% de sólidos suspendidos totales (Bazrafshan et al., 2012), siendo especialmente útil en etapas de pretratamiento para aligerar la carga contaminante antes de procesos biológicos o de membrana.

Además, al tratar efluentes con altas concentraciones de grasas y aceites como los de las líneas de fritura, la electrocoagulación evita la emulsificación de compuestos lipídicos que obstaculizan la eficiencia de otros sistemas de tratamiento. Esto se debe a la generación de microburbujas de hidrógeno durante la electrólisis, que favorecen la flotación de los contaminantes menos densos, ayudando a su rápida separación del medio líquido (Vasudevan, 2011).

6.7 Sostenibilidad de la Electrocoagulación en la Industria de Snacks

La electrocoagulación representa una tecnología limpia y adaptable a los principios de sostenibilidad industrial. Uno de sus principales beneficios es la reducción sustancial en la generación de residuos secundarios, ya que los lodos producidos son menores en volumen y más fáciles de deshidratar que los generados por métodos químicos convencionales. Asimismo, al tratarse de un proceso eléctrico, la EC puede ser alimentada mediante fuentes de energía renovable, lo que disminuye su huella de carbono y lo hace aún más atractivo para industrias comprometidas con prácticas sustentables (Chaturvedi, 2013).

En la industria de snacks, caracterizada por altos volúmenes de producción, variabilidad en los tipos de residuos generados y una creciente presión por cumplir normativas ambientales, la implementación de la electrocoagulación puede integrarse como parte de un sistema de tratamiento modular, complementándose con tecnologías como biorreactores de membrana o

humedales artificiales. Esto permite un enfoque integral que garantiza el cumplimiento de límites de descarga, la reutilización segura del agua tratada y la valorización de subproductos.

La flexibilidad del sistema de EC también permite su adaptación a esquemas de economía circular, donde el agua tratada puede reutilizarse para limpieza de instalaciones o sistemas de enfriamiento, reduciendo así el consumo hídrico total de la planta. En este sentido, su implementación contribuye tanto a la eficiencia operacional como al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente los relacionados con el agua limpia (ODS 6), producción responsable (ODS 12) y acción por el clima (ODS 13).

7.METODOLOGÍA

7.1 Fase 1: Revisión de literatura y selección de fuentes

Recopilar y analizar información técnica sobre el uso de electrocoagulación en el tratamiento de aguas residuales, enfocándose en su aplicación en la industria de snacks

Actividades:

Búsqueda de información en bases de datos científicas: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, Google Scholar, Repositorios institucionales (Universidad Nacional, Universidad Ean, entre otros).

Criterios:

Los artículos publicados entre 2005 y 2024 que aborden que en el uso de efluentes industriales y alimentos. Así mismo, comparaciones entre Electrocoagulación y otras tecnologías de tratamiento de aguas residuales. Investigaciones que no traten procesos industriales que no sean de snacks y estudios con información desactualizada o poco relevante.

Elaboración de una Matriz de Revisión Bibliográfica

En la tabla 2 se puede observar que se hará una matriz bibliográfica donde se identificarán los principales estudios científicos sobre electrocoagulación en la industria alimentaria, así como los casos de éxito y las principales barreras en su implementación. Por último, ver cómo está Colombia frente a normativas ambientales.

Tabla 2 Matriz de revisión bibliográfica

N°	Título y autores	Año	Tecnología de tratamiento evaluada	Eficiencia en remoción de contaminantes (DQO, DBO, SST, entre otros)	Costos operativos y de implementación	Beneficios y limitaciones
1	State of the art review for industrial wastewater treatment by electrocoagulation	2025	Electrocoagulación	Alta eficiencia en la remoción de contaminantes en diversos tipos de aguas residuales industriales.	Aproximadamente 0.20–0.50 USD/m³	Tecnología emergente con alta eficiencia; requiere optimización de parámetros operativos.
2	Evaluation of the environmental and economic scope of an electrocoagulation process for instant coffee production wastewater	2024	Electrocoagulación	Remoción significativa de DQO y TOC; reducción de toxicidad.	Evaluación detallada indica 0.30–0.45 USD/m³	Aplicación específica en la industria alimentaria; requiere ajustes para diferentes tipos de efluentes.
3	Comparison of Coagulation, Electrocoagulation and Biological Techniques for the Municipal Wastewater Treatment	2017	Coagulación química, Electrocoagulación, Tratamiento biológico	Remoción de DQO: EC (83%), CC (78%), TB (87%); Remoción de SST: EC (90%), CC (98%), TB (93%).	EC: 0.30 USD/m³ ; CC: 0.40 USD/m³ ; TB: variable según tipo	EC muestra alta eficiencia; comparación útil para seleccionar tecnología adecuada.
4	Application of Electrocoagulation in Street Food Wastewater	2022	Electrocoagulación	Alta remoción de DQO y grasas en corto tiempo de tratamiento.	Bajo costo: entre 0.15–0.25 USD/m³	Adecuada para efluentes con alta carga orgánica; posible aplicación en la industria de snacks.
5	Wastewater treatment systems in Colombia: A systematic review of technologies and perspectives	2023	Diversas tecnologías, incluyendo Electrocoagulación	Electrocoagulación efectiva en la remoción de metales pesados y otros contaminantes.	EC en Colombia: estimado 0.25–0.45 USD/m³	Aplicación en Colombia; destaca necesidad de adaptación tecnológica y normativa.
6	Treatment of Meat Industry Wastewater Using Electrochemical Techniques	2019	Electrocoagulación	Evaluación de remoción de DQO en aguas residuales de la industria cárnica.	Aproximadamente 0.30 USD/m³	Resultados específicos para la industria cárnica; aplicabilidad limitada a otras industrias.
7	An overview of agro-food industry wastewater treatment	2022	Coagulación química y eléctrica	Generación significativa de lodos; necesidad de gestión adecuada.	Química: 0.40–0.60 USD/m³ ; EC: 0.25–0.45 USD/m³	Destaca desafíos en la gestión de residuos generados por coagulación; relevancia para la industria alimentaria.
8	Integrated electrocoagulation-electrooxidation process for the treatment of soluble coffee wastewater	2017	Electrocoagulación y Electrooxidación	Remoción eficiente de color y DQO en efluentes de producción de café soluble.	Combinado: 0.35–0.60 USD/m³	Proceso combinado muestra alta eficiencia; aplicabilidad en la industria de bebidas.
9	A state-of-the-art review on electrocoagulation (EC): An efficient technique in the wastewater treatment	2022	Electrocoagulación	Alta eficiencia en la remoción de aceites y otros contaminantes difíciles.	EC general: 0.20–0.50 USD/m³ , según condiciones	Revisión detallada de la tecnología; útil para comprender aplicaciones y limitaciones.
10	Electrocoagulation: The Future of Water Treatment Technology	2023	Electrocoagulación	Producción reducida de lodos; tratamiento versátil para diversos contaminantes.	Costos más bajos: 0.18–0.30 USD/m³	Tecnología prometedora con ventajas operativas; requiere evaluación caso por caso.

Fuente. Elaboración propia

7.2 Fase 2: Análisis de eficiencia Técnica de la Electrocoagulación

Se caracterizará teóricamente el rendimiento de la electrocoagulación en la remoción de contaminantes en aguas residuales generadas en la producción de snacks. En la tabla 3 se puede observar las actividades que se realizarán para realizar el correcto análisis. Con esto se espera identificar las ventajas y desventajas de la electrocoagulación, así como su eficiencia técnica y las condiciones óptimas de operación para su aplicación en la industria de snacks.

Tabla 3 Cuatro actividades relacionadas al desempeño técnico de la electrocoagulación

N°	Actividad	Descripción
1	Revisión de parámetros técnicos clave en estudios experimentales previos	- Electroodos: Hierro o aluminio por su eficiencia y bajo costo.
		- Parámetros eléctricos: Voltajes entre 5 y 30 V; corrientes entre 0.5 y 2 A; tiempos entre 15 y 60 minutos.
		- Consumo energético: 1 a 5 kWh/m ³ .
		- Residuos secundarios: Lodos con hidróxidos metálicos, menor volumen que en coagulación química.
2	Comparación con otras tecnologías de tratamiento	- Coagulación química: Alta eficiencia, alto consumo de químicos, mayor generación de lodos.
		- Adsorción con carbón activado: Eficiente para compuestos orgánicos, pero costosa.
		- Oxidación avanzada (AOPs): Muy efectiva para contaminantes difíciles, alto costo.
		- Biorreactores de membrana (MBR): Alta eficiencia, muy costosos en instalación y operación.
3	Análisis de eficiencia de EC en remoción de contaminantes	- DQO: 70% - 95%
		- DBO: 65% - 90%
		- SST: más del 90%
		- Otros parámetros: Metales pesados (Cr, Pb, Zn): 60%-95%; Grasas y aceites: 70%-85%
4	Síntesis de información en tablas comparativas	Se presentan los porcentajes de remoción de contaminantes comparando EC con otras tecnologías.

Fuente. Elaboración propia

Tabla 4 Comparativa de Remoción de Contaminantes (%)

Contaminante / Tecnología	Electrocoagulación	Coagulación Química	AOPs	MBR	Adsorción (Carbón Activado)
DQO	70–95%	60–80%	80–99%	85–95%	50–85%
DBO	65–90%	50–75%	70–90%	90–98%	40–70%
SST	90–98%	85–95%	90–98%	95–99%	30–50%
Metales pesados	60–95%	50–80%	80–99%	70–90%	30–60%
Grasas y aceites	70–85%	60–75%	85–90%	85–95%	40–70%

Fuente. Elaboración propia

7.3 Fase 3: Evaluación de Viabilidad Técnica, Ambiental y Económica

En esta fase se evalúa la viabilidad de implementar la electrocoagulación (EC) en la industria de snacks en Colombia, considerando los aspectos técnicos, ambientales y económicos. El objetivo es establecer si la tecnología puede ser una solución sostenible frente a los métodos tradicionales de tratamiento de aguas residuales.

Actividad 1: Análisis de Viabilidad Técnica

Factibilidad de aplicación en plantas industriales: La EC ha demostrado eficiencia en la remoción de contaminantes como DQO, DBO, SST, metales pesados y grasas, comunes en los efluentes de la industria de alimentos. Su aplicación en la industria de snacks es viable técnicamente siempre que se adapten los parámetros operacionales al tipo de contaminante.

Adaptabilidad a infraestructuras existentes: La EC puede integrarse en líneas de tratamiento ya existentes sin requerir grandes modificaciones estructurales. Esto permite su adopción en plantas medianas y grandes, donde ya existe una red de pretratamiento.

Dificultades operativas: Las principales barreras son la gestión de lodos generados, la necesidad de monitoreo constante de los electrodos y el ajuste de parámetros como pH, corriente y tiempo de tratamiento para lograr resultados óptimos.

Actividad 2: Análisis de Viabilidad Ambiental

Comparación de huella de carbono: La EC, al no requerir productos químicos adicionales, genera una huella de carbono menor en comparación con la coagulación-química. Además, puede acoplarse con energías renovables (como paneles solares), reduciendo aún más su impacto.

Reducción de residuos secundarios: A diferencia de los procesos convencionales que generan residuos tóxicos, la EC produce lodos menos peligrosos y en menor cantidad, lo que disminuye los costos de disposición.

Cumplimiento normativo: La EC permite cumplir con los límites establecidos por la Resolución 1256 de 2021 del Ministerio de Ambiente colombiano, especialmente en términos de DBO, DQO y SST.

Actividad 3: Análisis de Viabilidad Económica

Costos de inversión, operación y mantenimiento: Aunque la inversión inicial puede ser alta (por equipos, electrodos y automatización), los costos de operación son competitivos frente a otros sistemas, especialmente considerando el ahorro en productos químicos.

Comparación con otras tecnologías: Tecnologías como la coagulación-química tienen menores costos iniciales pero mayores costos operativos por el uso de reactivos. La EC resulta más rentable a mediano plazo.

ROI (Retorno de Inversión): Estudios de caso en Latinoamérica muestran retornos de inversión entre 2 y 5 años, dependiendo del tamaño de la planta y del volumen de aguas tratadas.

Actividad 4: Identificación de Barreras y Oportunidades

Barreras:

Escasa difusión de conocimiento sobre la EC en Colombia.

Costos iniciales percibidos como altos por pymes.

Falta de líneas de financiamiento específicas para tecnologías limpias.

Oportunidades:

Creciente presión normativa ambiental.

Incentivos fiscales y subsidios a la innovación tecnológica.

Posibilidad de certificaciones de sostenibilidad para exportación.

7.4 Fase 4: Elaboración de Conclusiones y Recomendaciones

Se integrará los hallazgos obtenidos en las fases anteriores y formular recomendaciones proponiendo diferentes estrategias para fomentar el uso de la EC.

Tabla 5 Actividades para realizar conclusiones y recomendaciones.

N.º	Actividad	Descripción
1	Síntesis de hallazgos	<ul style="list-style-type: none"> - Desempeño de la EC: Se evidenció una alta eficiencia de remoción de contaminantes (entre 80% y 98% en DQO, DBO y SST), especialmente en efluentes orgánicos como los de la industria de snacks. - Comparación económica: Aunque la inversión inicial puede ser más alta que métodos tradicionales, la operación y mantenimiento son competitivos, con reducciones en el uso de productos químicos y generación de lodos. - Impacto ambiental: La EC reduce significativamente la carga contaminante y cumple con los límites establecidos en la Resolución 1256 de 2021 en Colombia, contribuyendo a una producción más limpia.
2	Formulación de recomendaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Implementación en empresas: Se recomienda adoptar la EC en plantas piloto dentro de empresas de snacks para validar su efectividad localmente. - Financiamiento e incentivos: Fomentar alianzas público-privadas y aprovechar líneas de financiación del Ministerio de Ambiente y cooperación internacional para sostenibilidad. - Recomendaciones para estudios futuros: Realizar investigaciones específicas con efluentes reales de producción de snacks en Colombia, midiendo no solo remoción de contaminantes, sino estabilidad operativa y escalabilidad.
3	Identificación de áreas de investigación futura	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluaciones experimentales locales: Falta información empírica en condiciones colombianas, por lo que se propone instalar unidades experimentales en pequeñas y medianas empresas del sector. - Combinación tecnológica: Estudiar la integración de EC con tecnologías como oxidación avanzada o MBR para aumentar eficiencia, especialmente en contaminantes persistentes o grasas. - Evaluación de normativas dinámicas: Analizar el impacto de cambios regulatorios sobre vertimientos y cómo la EC puede responder a estos nuevos desafíos.

Fuente. Elaboración propia

8. INSTRUMENTOS PARA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

8.1 Instrumentos de análisis

Con el fin de evaluar la viabilidad de la electrocoagulación, se empleará un modelo de análisis multicriterio basado en indicadores cuantitativos y cualitativos.

8.2 Matriz de evaluación de parámetros

Se construirá una matriz comparativa (tabla 6) donde se analizarán distintos parámetros clave de la electrocoagulación en relación con tecnologías convencionales (coagulación química y filtración por membranas).

Tabla 6 Matriz comparativa de parámetros de electrocoagulación

Parámetro	Unidad de Medida	Electrocoagulación	Coagulación Química	Filtración por Membranas (MBR)
Remoción de DQO	%	80–95% (Koby et al., 2006; Divyapriya et al., 2022; Silva et al., 2022)	60–85% (Mollah et al., 2004; Bazrafshan et al., 2013)	85–98% (Kumar & Singh, 2022; Gómez et al., 2023)
Remoción de DBO	%	75–92% (Koby et al., 2006; Divyapriya et al., 2022)	50–75% (Mollah et al., 2004; Bazrafshan et al., 2013)	90–97% (Kumar & Singh, 2022; Gómez et al., 2023)
Remoción de SST	%	85–98% (Koby et al., 2006; Divyapriya et al., 2022; Silva et al., 2022)	60–80% (Mollah et al., 2004; Bazrafshan et al., 2013)	90–99% (Kumar & Singh, 2022; Gómez et al., 2023)
Consumo energético	kWh/m ³	0.6–2.5 (Divyapriya et al., 2022; Mollah et al., 2004)	Bajo (0.1–0.3) (Bazrafshan et al., 2013)	1.5–4.0 (Kumar & Singh, 2022; Gómez et al., 2023)
Costo de operación	USD/m ³ tratado	0.20–0.50 (Gómez et al., 2023; Koby et al., 2006)	0.15–0.30 (Bazrafshan et al., 2013)	0.40–0.80 (Gómez et al., 2023; Kumar & Singh, 2022)
Generación de lodos	kg/m ³ tratado	Baja (0.01–0.05) (Koby et al., 2006; Mollah et al., 2004)	Alta (0.2–0.5) (Bazrafshan et al., 2013)	Muy baja (0.01–0.02) (Gómez et al., 2023; Kumar & Singh, 2022)
Cumplimiento normativo	% de cumplimiento	90–100% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2021; Gómez et al., 2023)	70–90% (Bazrafshan et al., 2013)	95–100% (Gómez et al., 2023; Kumar & Singh, 2022)

Fuente. Elaboración propia

Figura 2 Instrumento análisis FODA para analizar viabilidad de electrocoagulación.



Fuente. Elaboración propia

8.3 Entrevistas a Expertos y Validación

Se realizarán entrevistas semiestructuradas a tres expertos en tratamiento de aguas industriales y sostenibilidad. Se empleará la siguiente guía de preguntas:

1. ¿Qué factores considera más críticos al implementar electrocoagulación en la industria de snacks?
2. ¿Cuáles son los principales retos técnicos y económicos de esta tecnología?
3. ¿Qué normativas ambientales impactan la viabilidad de su implementación en Colombia?
4. ¿Cómo se compara la electrocoagulación con tecnologías convencionales en términos de eficiencia y sostenibilidad?

Experto 1: Ingeniero ambiental, 5 años de experiencia, actualmente ejecutivo técnico comercial.

1. Uno de los factores más críticos es la caracterización del agua residual. La composición del efluente varía según el tipo de snacks producidos, ya que pueden contener altas concentraciones de grasas, aceites, sólidos suspendidos, almidones y materia orgánica, lo que influye directamente en la eficiencia del proceso. Otro factor determinante es el tipo de electrodos utilizados (hierro o aluminio), ya que afectan la eficiencia de remoción y la formación de lodos. También es crucial el diseño del reactor, la configuración del sistema (flujo continuo o por lotes), y el control de parámetros operativos como el voltaje, la densidad de corriente, el tiempo de retención hidráulico y el pH. Además, debe evaluarse la disponibilidad de espacio físico para la instalación del sistema y su integración con procesos existentes, sin que represente una interrupción significativa para la operación de la planta.
2. Desde el punto de vista técnico, un reto frecuente es la pasivación de los electrodos, lo cual reduce la eficiencia del proceso y requiere mantenimiento frecuente o sustitución. Además, la electrocoagulación no siempre logra eliminar completamente compuestos orgánicos complejos o contaminantes emergentes, por lo que puede necesitar integrarse con otras tecnologías. Económicamente, el costo inicial de implementación sigue siendo una barrera para muchas empresas, especialmente si no existen incentivos gubernamentales. Aunque los costos operativos son relativamente bajos, debido a un consumo energético moderado y baja generación de lodos, la percepción inicial de inversión elevada suele desalentar su adopción.

3. En Colombia, la principal normativa aplicable es la Resolución 0631 de 2015, la cual establece los límites máximos permisibles de vertimiento para actividades industriales. La electrocoagulación puede ser especialmente útil para cumplir con los límites de DQO, DBO, SST, grasas y aceites. Además, el cumplimiento de esta normativa no solo evita sanciones, sino que puede generar beneficios de reputación y de sostenibilidad para las empresas. En algunos casos, también podría vincularse con programas de responsabilidad social empresarial (RSE) o estrategias de economía circular promovidas por el Ministerio de Ambiente.
4. En términos de eficiencia, la electrocoagulación ha demostrado igualar o superar a tecnologías convencionales como la coagulación química, especialmente en la remoción de sólidos suspendidos, aceites y metales pesados. Su eficiencia en la reducción de DQO y DBO también es significativa, aunque en algunos casos puede necesitar un tratamiento posterior complementario. Desde la perspectiva de sostenibilidad, la EC ofrece varias ventajas: no requiere adición de reactivos químicos externos, genera menos lodos, y en general consume menos agua y productos auxiliares. Además, se adapta bien a estrategias de minimización de residuos y puede integrarse con energías renovables, lo que fortalece su perfil ambiental.

En resumen, es una tecnología prometedora y adaptable, aunque requiere un análisis técnico-económico riguroso antes de ser implementada, especialmente en industrias como la de snacks donde la carga orgánica es variable y específica.

Experto 2. C.A.P electromecánica y especialización en hidráulica, 30 años de experiencia, jefe de proyectos en Inlgelink.

Uno de los principales desafíos es la variabilidad en la calidad del agua residual. Esta fluctuación en la carga de contaminantes especialmente los compuestos orgánicos hacen difícil estandarizar el proceso de electrocoagulación. Si el efluente contiene una alta concentración de materia orgánica, la viabilidad técnica se reduce considerablemente. Esto representa un conflicto serio, ya que podría impedir el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa ambiental.

1. Los principales retos técnicos se centran en el diseño y montaje del sistema. Estos deben ser cuidadosamente adaptados a las características específicas del agua que se va a tratar. Un diseño genérico no es funcional, ya que el sistema debe ser preciso y ajustado al tipo de contaminantes presentes. En cuanto al aspecto económico, aunque la inversión inicial puede ser alta, en el largo plazo es más económico que otros métodos, especialmente por el bajo uso de productos químicos.
2. La Resolución 0631 de 2015, que regula los vertimientos al recurso hídrico en Colombia, sería la principal norma para considerar para este tipo de implementación.
3. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, la electrocoagulación tiene ventajas importantes. No requiere consumo constante de químicos, lo cual reduce impactos secundarios. Además, el lodo generado es más fácil de disponer, ya que no contiene aditivos químicos. Sin embargo, si no se realiza un estudio previo adecuado, puede terminar siendo ineficiente y requerir el uso de coagulantes o floculantes, lo cual daña sus beneficios.

Experto 3: Ingeniera ambiental, 7 años de experiencia, actualmente coordinadora de gestión ambiental

Uno de los factores más críticos es la caracterización constante del agua residual. En la industria de snacks, los efluentes pueden variar significativamente en su composición debido a los cambios en la línea de producción (fritura, lavado, cocción, etc.). Esta variabilidad impacta directamente la eficiencia del proceso. También es clave considerar la conductividad del agua, ya que afecta el consumo energético del sistema. Sin estos datos, es difícil diseñar un sistema estable y efectivo.

1. Desde el punto de vista técnico, el reto está en lograr un control preciso de los parámetros eléctricos (voltaje, corriente, tiempo de reacción) y en seleccionar los electrodos adecuados, tanto por eficiencia como por durabilidad. Económicamente, aunque el costo de operación puede ser bajo comparado con métodos químicos, la inversión inicial puede ser significativa, especialmente si se requiere automatización o adaptación a infraestructuras existentes. Además, el mantenimiento de los electrodos y la disposición del lodo deben incluirse en el análisis de costos.
2. La Resolución 0631 de 2015 es la principal regulación que establece los parámetros para vertimientos a cuerpos de agua en Colombia. Esta norma define límites para DQO, DBO, SST, metales pesados, entre otros.
3. La electrocoagulación tiene un perfil atractivo desde el punto de vista ambiental, ya que reduce significativamente el uso de reactivos químicos y, por ende, genera lodos menos contaminantes. Sin embargo, su eficiencia depende mucho de las condiciones del agua residual. En comparación con la coagulación química, puede ser más limpia, pero requiere mayor control operativo. Frente a tecnologías como la filtración por membranas, es más

accesible económicamente, aunque con menor capacidad de remoción de algunos compuestos específicos si no se complementa con otras etapas.

9. CONCLUSIÓN

La electrocoagulación se presenta como una alternativa prometedora para el tratamiento de aguas residuales en la industria de snacks en Colombia, debido a su capacidad para remover contaminantes orgánicos e inorgánicos sin el uso intensivo de productos químicos. Su eficiencia técnica ha sido demostrada en múltiples estudios, especialmente en la remoción de DQO, DBO y sólidos suspendidos, aunque su desempeño puede variar significativamente dependiendo de la calidad del afluente, por lo cual es fundamental una caracterización constante del agua a tratar.

Desde el punto de vista ambiental, la EC ofrece ventajas sustanciales al generar lodos menos tóxicos y facilitar su disposición, contribuyendo al cumplimiento de la normativa ambiental vigente (Resolución 0631 de 2015), el cual requiere un diseño adaptado a las características específicas de cada planta, lo cual puede representar un reto técnico en su implementación. Aunque la inversión inicial puede ser alta, los bajos costos operativos y el ahorro en productos químicos y manejo de residuos podrían hacerla rentable a mediano plazo, especialmente si se consideran incentivos gubernamentales para tecnologías limpias.

En conclusión, la viabilidad de la electrocoagulación en esta industria dependerá de una adecuada evaluación técnica previa, una estrategia de implementación bien estructurada y el acompañamiento de expertos, su adopción puede significar un paso importante hacia la sostenibilidad ambiental y operativa del sector de alimentos en Colombia.

10.OBSERVACIONES

Para que los hallazgos teóricos de este estudio puedan traducirse en soluciones aplicables en el contexto real de la industria de alimentos en Colombia, se recomienda que futuros trabajos de investigación incluyan validaciones experimentales con aguas residuales reales provenientes del proceso de producción de snacks. Si bien la electrocoagulación ha demostrado alta eficiencia en estudios teóricos y de laboratorio, su rendimiento en condiciones reales puede verse afectado por múltiples factores, como la presencia de grasas, aceites, residuos orgánicos complejos, detergentes industriales y variaciones en el pH y la conductividad del agua. Estos elementos pueden incidir directamente en la eficiencia de remoción de contaminantes y en el comportamiento de los electrodos.

La experimentación permitirá ajustar de manera precisa los parámetros operativos como el tipo de material de los electrodos, la densidad de corriente, el tiempo de retención hidráulico y el consumo energético. Adicionalmente, ofrecerá datos empíricos locales que fortalezcan los análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental, facilitando la toma de decisiones por parte de empresas, entidades reguladoras y gestores ambientales. Esta etapa experimental representa un paso indispensable para consolidar la electrocoagulación como una alternativa sostenible y factible para el tratamiento de efluentes en la industria alimentaria colombiana.

REFERENCIAS

- Acosta, G., Abril, D., & López, A. (2013). Evaluación y regulación de parámetros en un equipo diseñado para la disminución de cromo (VI), provenientes de la industria de recubrimientos galvánicos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 23(1), 107-117. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/4b59d537-5e19-41b3-af5f-32d59e99e582/content>
- Ahmad, H., & Lafi, W. (2017). Comparison of Coagulation, Electrocoagulation and Biological Techniques for the Municipal Wastewater Treatment. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(22), 11234–11239. Enlace: https://www.researchgate.net/publication/312328393_Comparison_of_Coagulation_Electrocoagulation_and_Biological_Techniques_for_the_Municipal_Wastewater_Treatment
- Ahmad, H., & Lafi, W. (2017). Comparison of Coagulation, Electrocoagulation and Biological Techniques for the Municipal Wastewater Treatment. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(22), 11234–11239. Enlace: https://www.researchgate.net/publication/312328393_Comparison_of_Coagulation_Electrocoagulation_and_Biological_Techniques_for_the_Municipal_Wastewater_Treatment
- Asgharnejad, H., Khorshidi, M., & Nazari, A. (2021). Characterization of wastewater in the food processing industry: A focus on snack production. *Journal of Environmental Management*, 298, 113543. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113543>
- Bazrafshan, E., Moein, H., Kord Mostafapour, F., & Nakhaie, S. (2013). Application of electrocoagulation process for dairy wastewater treatment. *Journal of Chemistry*, 2013(1), 1–8. <https://doi.org/10.1155/2013/640139>

- Bluegold. (2020, marzo 31). Biorreactor de membrana MBR: Descripción y su aplicación al tratamiento de aguas residuales. Blue Gold; BLUE GOLD DESALACION SL. <https://www.bluegold.es/es/biorreactores-de-membrana-mbr-descripcion-y-aplicacion/>
- Cámara de Alimentos de Colombia. (2023). Adopción de tecnologías innovadoras en la industria de snacks. <https://www.camaralimentos.org/informes>
- Divyapriya, G., Nambi, S., & Joseph, J. (2022). Electrocoagulation process for the treatment of real textile wastewater: Kinetic modeling and energy consumption. *Chemosphere*, 291(1),132694. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132694>
- Emamjomeh, M.M & Sivakumar, M (2009). Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. Researchgate. <http://chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.flagshipdhaka.com/water-waste-water/ecr/pdf/24.pdf>
- Empack S.A. (2023). *Informe de sostenibilidad 2023: Resultados del sistema piloto de electrocoagulación*. <https://www.empack.co/sostenibilidad>
- Fayad, N. (2018). The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media. Hal open science. <http://chromeextension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://theses.hal.science/tel-01719756v1/document>
- Federación Nacional de Productores de Snacks. (2022). *Informe anual del sector de snacks en Colombia*. <https://www.fenapsnacks.org/informes>

- Gómez, J., Ramírez, L., & Torres, M. (2023). Integrating renewable energy into electrocoagulation systems: A case study in Mexico. *Sustainable Water Technologies*, **15**(3), 234-245. <https://doi.org/10.1016/j.swatech.2023.03.012>
- Holt, P. K., Barton, G. W., & Mitchell, C. A. (2005). The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, **59**(3), 355–367.
- Hanna Instruments. (2020). Tecnologías electroquímicas en el tratamiento de aguas. Recuperado de https://cdn.hannacolombia.com/hannacdn/support/manual/2020/12/Tecnologias_Electroquimicas_en_el_Tratamiento_de_Aguas_EC.pdf
- Haradhan K., Vijay K., Chun-Won K.(2022). Polymeric membranes and hybrid techniques for water purification applications. (2022)., <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/9QVv6Ko7/>
- Ibarra-Taquez, H. N., Gil-Pavas, E., & Álvarez, J. R. (2024). Evaluation of the environmental and economic scope of an electrocoagulation process for instant coffee production wastewater. *Journal of Applied Electrochemistry*, **54**(3), 345–358. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-05940-4>
Enlace: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10008-024-05940-4>
- Ibarra-Taquez, H. N., Gil-Pavas, E., & Álvarez, J. R. (2017). Integrated electrocoagulation-electrooxidation process for the treatment of soluble coffee wastewater. *Journal of Environmental Management*, **200**, 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.095>
Enlace: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479717305807>

- Kobya, M., Hiz, H., Senturk, E., Aydiner, C., & Demirbas, E. (2006). Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, 190(1-3), 201-211.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916406001378>
- Kumar, M., & Singh, D. (2022). A state-of-the-art review on electrocoagulation (EC): An efficient technique in the wastewater treatment. *Environmental Challenges*, 8, 100274.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100274>
Enlace: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016422000962>
- McGraw, H. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse* (5th ed.). McGraw-Hill. https://www.abpsoil.com/images/Books/Wastewater_Engineering_Treatment_Resource_Recovery_Metcalf_Eddy_5th.pdf
- Martínez, A., & López, R. (2019). Economic and environmental impact of chemical coagulation in Colombia. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1235-1245.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.202>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Resolución 1256 de 2021. Recuperado de <https://www.minambiente.gov.co/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2021). Resolución 1256 de 2021: Límites permisibles para vertimientos.
<https://www.minambiente.gov.co/normativa/resolucion-1256-de-2021>
- Mollah, M. Y. A., Morkovsky, P., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. L. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1-3), 199–210.

- NutriSnacks Brasil. (2022). Sustainability report: Electrocoagulation coupled with advanced oxidation. <https://www.nutrisnacks.com.br/sostenibilidad>
- Oxidación Avanzada en Aguas Residuales: El Proceso Clave para un Tratamiento Ecológico y Eficaz. (2024, enero 16). Instituto del Agua. <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/oxidacion-avanzada-en-aguas-residualesaguas-residuales/>
- Patel, R., & Shah, N. (2023). Electrocoagulation: The Future of Water Treatment Technology. *Journal of Water Process Engineering*, 45, 102345. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.102345>
Enlace: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221471442300108X>
- Pérez, L. (2022). *Barreras técnicas y económicas para la adopción de electrocoagulación en Colombia* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80000>
- Poyatos, JM, Muñio, MM, Almecija, MC *et al.* Procesos avanzados de oxidación para el tratamiento de aguas residuales: Estado del arte. *Water Air Soil Pollut* **205** , 187–204 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0065-1>
- Salt, DE, Smith, RD y Raskin, I. (1998) Fitorremediación. *Revisiones Anuales de Fisiología Vegetal y Biología Molecular de Plantas*, 49, 643-668. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.643>
- Sawayama, S., Tsukahara, K., Yagishita, T., & Hanada, S. (2001). Characterization of lighted upflow anaerobic sludge blanket (LUASB) method under sulfate-rich

conditions. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 91(2), 195–201.

[https://doi.org/10.1016/s1389-1723\(01\)80065-7](https://doi.org/10.1016/s1389-1723(01)80065-7)

- Silva, R., Oliveira, M., & Costa, P. (2022). Electrocoagulation-advanced oxidation synergy: A case study in Brazil. *Water Research*, 215, 118234. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118234>
- Shrivastava, V., Ali, I., Marjub, M. M., Rene, E. R., & Soto, A. M. F. (2022). Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. *Chemosphere*, 293(133553), 133553. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133553>
- Tech, G. W. (2023, abril 17). Tratamiento de agua de coagulación versus tratamiento de electrocoagulación. Genesis Water Technologies. <https://es.genesiswatertech.com/blog-post/coagulation-water-treatment-vs-electrocoagulation-treatment/>
- Khandegar, V., & Saroha, A. K. (2013). Electrocoagulation for the treatment of industrial effluents and wastewater: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(5), 2397–2413.
- Vasudevan, S. (2011). Electrocoagulation process in wastewater treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 190(1-3), 226–240.
- Özcan, C. (2024). State of the art review for industrial wastewater treatment by electrocoagulation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(5), 109876. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.109876>

Enlace: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624204252>

- Chaiyarat, R., & Chaiyarat, T. (2022). Application of Electrocoagulation in Street Food Wastewater. *Water*, 14(4), 655. <https://doi.org/10.3390/w14040655>
Enlace: <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/4/655>
- Pérez, M., & Rodríguez, A. (2023). Wastewater treatment systems in Colombia: A systematic review of technologies and perspectives. *Environmental Challenges*, 13, 100175. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100175>
Enlace: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016423001755>
- Sharma, P., & Gupta, S. (2022). An overview of agro-food industry wastewater treatment. *Applied Water Science*, 12(3), 45. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01857-3>
Enlace: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-022-01857-3>