

**EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA UN ÓPTIMO TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES**

(Autor)

LUIS ALFREDO MENDOZA MENDOZA

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA**



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PAMPLONA, mes día de año

**EVALUACIÓN DE LAS VARIABLES EN EL PROCESO DE
ELECTROCOAGULACIÓN PARA UN ÓPTIMO TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES**

(Autor) LUIS ALFREDO MENDOZA MENDOZA

**Trabajo de monografía presentado como requisito para optar al título de
INGENIER(A)O QUÍMIC(A)O**

Director: MANUEL ANDRES RIVERA GUERRERO

Ingeniero químico, MSc, en controles industriales

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y
QUÍMICA**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Pamplona, 12/21/2020

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, por su amor, comprensión, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias por ser mi motivación y mi mayor apoyo.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, A dios por brindarme la vida, salud y sabiduría en este proceso de mi vida el cual ha sido una experiencia muy gratificante a pesar de todas las dificultades que se me presentaron, pero que con la fortaleza y la manera en que me guio pude superar esos momentos de dificultad y debilidad

A mis padres Ayda Mendoza y Néstor Mendoza por ser la principal promotora de mis sueños, por confiar y creer en mis capacidades, por los consejos, valores y principios que me ha inculcado.

A la Universidad de Pamplona, a los docentes del programa de Ingeniería Química, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de mi profesión y por último a dos grandes amigos y compañeros Édison Gómez y Nicolas Santamaria los cuales me brindaron su apoyo y me ayudaron acrecer como estudiante y persona en el tiempo que compartimos en esta bonita carrera llamada ingeniería química.

GLOSARIO

Ánodo: El ánodo es un electrodo en el que se produce una reacción de oxidación, mediante la cual un material, al perder electrones, incrementa su estado de oxidación.

Cátodo: Un cátodo es un electrodo que sufre una reacción de reducción, mediante la cual un material reduce su estado de oxidación al recibir electrones.

Voltaje: La tensión eléctrica o diferencia de potencial es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

Densidad de corriente: magnitud vectorial que tiene unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, es decir, intensidad por unidad de área.

EC: electrocoagulación

Electrodo: Extremo de un conductor en contacto con un medio, al que lleva o del que recibe una corriente eléctrica.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	12
2. PLANTEAMIENTO y JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo general.....	14
3.2 Objetivos específicos	14
4. VARIABLES DE MAYOR IMPORTANCIA DE LA ELECTROCOAGULACION EN EL TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES	15
4.1 FUNDAMENTOS	15
4.1.1 LA ELECTROQUÍMICA	15
4.1.2 REACCIONES INVOLUCRADAS EN LA ELECTROCOAGULACIÓN	17
4.1.3 principales contaminantes en los efluentes de agua.....	18
4.2. Identificación de los trabajos más destacados sobre el proceso de electrocoagulación	20
4.2.1 estudio de EC a nivel nacional para la identificación de variables más representativas	20
4.2.1.1 Diseño de una celda electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de una industria láctea	20
4.2.1.2 electrocoagulación como tratamiento para aguas residuales provenientes del proceso curtición de una curtiembre.....	21
4.2.2 Estudio de trabajos destacados a nivel internacional para la identificación de variables más representativas	23
4.3 Efecto de las variables de proceso en la electrocoagulación.....	26
4.3.1 efecto del pH.....	26
4.3.2 efecto de la densidad de corriente.....	27

4.3.3	efecto de la conductividad	27
4.3.4	efecto de la temperatura	27
4.3.5	efecto del tiempo de residencia	28
4.3.6	efecto del material del electrodo	28
4.3.7	efecto de la distancia entre electrodos.....	29
4.4	comparacion de la ec con diferentes metodos de tratamientos de aguas	29
5.	ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.....	31
6.	CONCLUSIONES	33
7.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	35
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
9.	ANEXOS.....	39

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del agua	19
Tabla 2 Parámetros de diseño para una celda electrolítica en la industria láctea	21
Tabla 3 parámetros de diseño de una celda electrocoagulación para el proceso de curtición de una curtiembre	22
Tabla 4 parámetros de diseño de una celda electrocoagulación para el proceso de remoción de color.....	23
Tabla 5 Condiciones de operación encontradas para una celda electrolítica en artículos internacionales	24
Tabla 6 ventajas y desventajas de métodos de tratamientos de aguas	29

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de la electrolisis.....	15
Figura 2 montaje para un sistema de electrocoagulación	16
Figura 3 Procesos involucrados en un reactor de electrocoagulación	17

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor de dos millones de personas mueren al año en el mundo por falta de agua potable, Más del 97% del agua en la Tierra es salada. Dos tercios del agua dulce está retenida en glaciares y capas de hielo polar. De lo que queda, la mayor parte está atrapada en el suelo o en acuíferos subterráneos (Alzahrani et al., 2020). Para la humanidad el agua es un recurso muy importante e indispensable en diario vivir ya que es muy utilizada en el consumo humano y en muchos procesos industriales, los cuales generan la contaminación de este recurso hídrico agotando así su disponibilidad en la tierra. Para prevenir el desabastecimiento de este líquido preciado se han implementado distintos procesos de tratamientos de agua como lo es la filtración, la sedimentación, la electrocoagulación entre otros.

La electrocoagulación (EC) ha tomado mayor importancia en los últimos años a pesar de que su desarrollo comenzó en el siglo XX (1909) en los estados unidos (Piña-Soberanis et al., 2011). La (EC) es un proceso que aplica los principios de la coagulación–floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional como se puede observar en la figura 1 (Gonzalo Morante, 2002). Este proceso de EC consiste en la aplicación de una corriente eléctrica que va dirigida a una celda, la cual contiene un ánodo que es corroído electrolíticamente por oxidación y un cátodo que estará sujeto a la reducción. Los iones que se producen mediante este proceso forman grandes cadenas de polihidróxidos que son diferentes a los que se generan en la coagulación convencional cuando se utilizan sales químicas. Estos polihidróxidos producidos por EC permiten retener, desecar y retirar con mayor facilidad los lodos residuales (Piña-Soberanis et al., 2011).

Los materiales que mas son utilizados en la producción de electrodos son el aluminio (Al) que forma iones Al^{+3} y el hierro (Fe) que produce iones Fe^{+3} los cuales reaccionaran con el OH^- que es formado catódicamente y producirá hidróxido del metal ($MXOH$) que cumplirá la función de absorber los contaminantes (Amarine et al., 2020). Este tipo de electrodos pueden ser configurados de distintas maneras (serie y paralelo) al igual que otras variables de proceso como lo son la temperatura, el voltaje, la corriente, tiempo, la forma del electrodo los cuales serán analizados en este trabajo mediante una revisión bibliográfica (Moradi et al., 2021).

2. PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

En la actualidad la humanidad afronta la que quizás puede convertirse en la mayor problemática del siglo XXI, que es evitar el desabastecimiento de agua apta para el consumo humano a nivel mundial. Esta insuficiencia ha generado el desafío de investigar y optar por mejorar tecnologías que generen resultados en la protección, recuperación y conservación del recurso hídrico que se ha visto duramente afectado por los procesos industriales que realiza el ser humano los cuales contaminan los cuerpos de aguas con materia orgánica, organismos patógenos y residuos tóxicos y peligrosos (Feria Diaz et al., 2014).

Tecnologías como oxidación con compuestos electro-generados, electro-floculación, electrocoagulación han sido de gran ayuda para la mitigación de este problema ya que presentan altos porcentajes de remoción de contaminantes y ofrecen ventajas competitivas frente a las tecnologías tradicionales (Mayta & Mayta, 2017).

La electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de la coagulación-floculación en un reactor electrolítico utilizado en el tratamiento de aguas residuales que es utilizada en algunos casos, pero sin sustituir totalmente los procedimientos químicos y biológicos que se han venido aplicando desde tiempos muy remotos (Nguyen et al., 2020). La naturaleza misma ha mitigado los impactos ambientales causados por el hombre, reestablecido el equilibrio ecológico y biológico necesario para la supervivencia de este (Gonzalo Morante, 2002).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las variables de mayor importancia en el proceso de electrocoagulación para los tratamientos de aguas residuales

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- identificar los trabajos más destacados sobre el proceso de electrocoagulación con el fin de identificar las variables de proceso más representativas
- analizar cómo afectan el proceso de electrocoagulación las variables más representativas
- comparar la electrocoagulación con los métodos tradicionales más utilizados en el tratamiento de aguas.

4. VARIABLES DE MAYOR IMPORTANCIA DE LA ELECTROCOAGULACION EN EL TRATAMIENTO AGUAS RESIDUALES

La electrocoagulación puede presentarse como excelente alternativa para los procesos de tratamientos de agua. Esta presenta como ventaja la química de acoplamiento (generación de oxidantes *in situ*) debido a la transferencia de electrones (Prieto García *et al.*, 2012). Se ha demostrado que esta tecnología resulta ser limpia y manejable, ya que evita el uso de agentes químicos, eliminando la posibilidad de una contaminación secundaria provocada por los mismos (Piña-Soberanis *et al.*, 2011).

4.1 FUNDAMENTOS

4.1.1 la electroquímica

La electroquímica es una rama de la química que basa su estudio en la interacción y correlación de los procesos químicos y eléctricos por medio de reacciones de óxido-reducción.

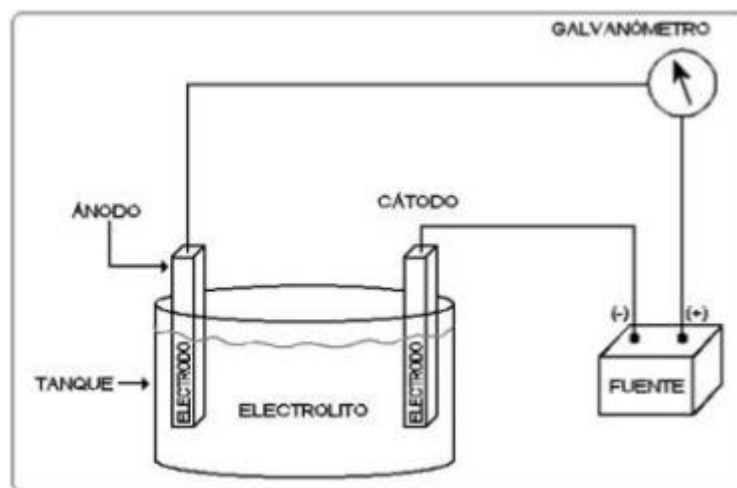


Figura 1 Esquema de la electrolisis (Feria Diaz *et al.*, 2014).

En Reino Unido, se propuso por primera vez el uso de la electricidad para el tratamiento de aguas residuales, desde ese momento se estudiaron diferentes técnicas electroquímicas, con el fin de ser empleadas como tecnologías para la remoción de metales pesados presentes en efluentes y para el tratamiento de aguas de consumo (Alaya Esparraga & Barboza Elera, 2018). En la actualidad se han implementado diferentes tecnologías que se basan en el desarrollo de procesos electroquímicos, entre las principales encontramos, la electrocoagulación, la electroflotación, electrodeposición, la electrodialisis, entre otras (Moya, 2011).

La electrocoagulación es un proceso donde se utiliza montaje como el de la figura 2 que emplea electricidad para remover contaminantes presentes en el agua, estos se encuentran disueltos,

suspendidos o emulsificados. Esta técnica es aplicada al inducir corriente eléctrica por medio de placas metálicas que provocan la desestabilización de los contaminantes que se encuentran presentes, para su posterior eliminación de la disolución.

En esta técnica se produce el coagulante *in situ*, debido a la generación de iones metálicos en el ánodo y a la liberación de burbujas de hidrogeno gaseoso que se presenta en el cátodo, por lo que al neutralizar las cargas se provoca la formación de agregados como se puede observar en la figura 3. Cuando esto ocurre, se presenta la flotación de las partículas floculadas, las mismas que serán retiradas posteriormente (“La Electrocoagulación: Una Alternativa Para El Tratamiento de Aguas Residuales,” 2005).

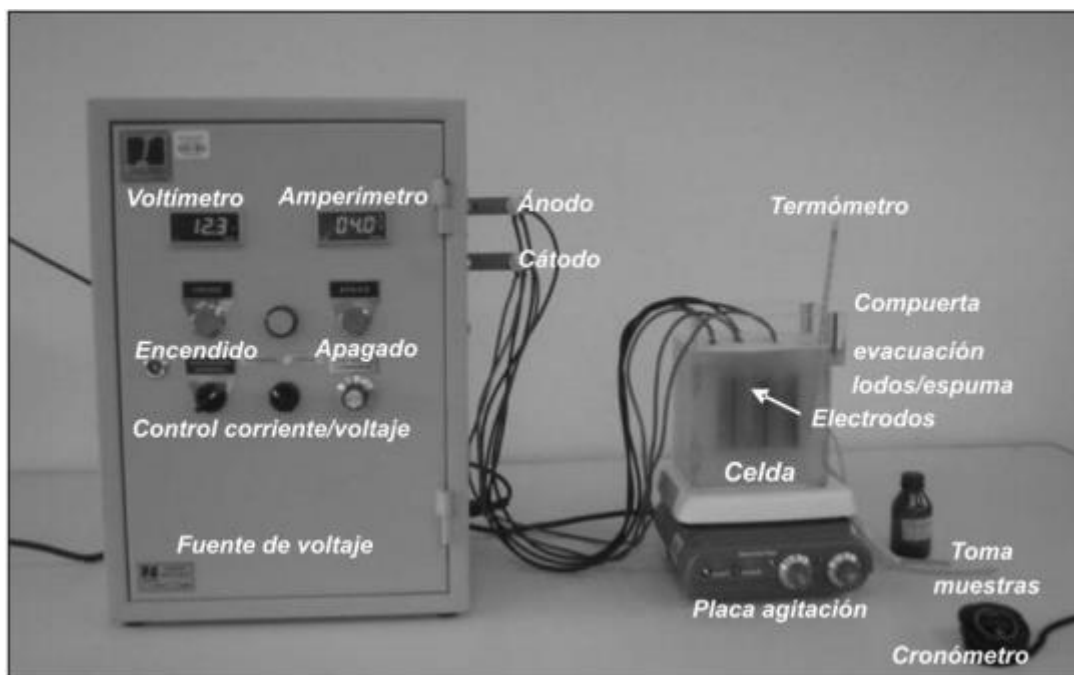


Figura 2 montaje para un sistema de electrocoagulación (Garcés Giraldo & Ruiz Arango, 2007).

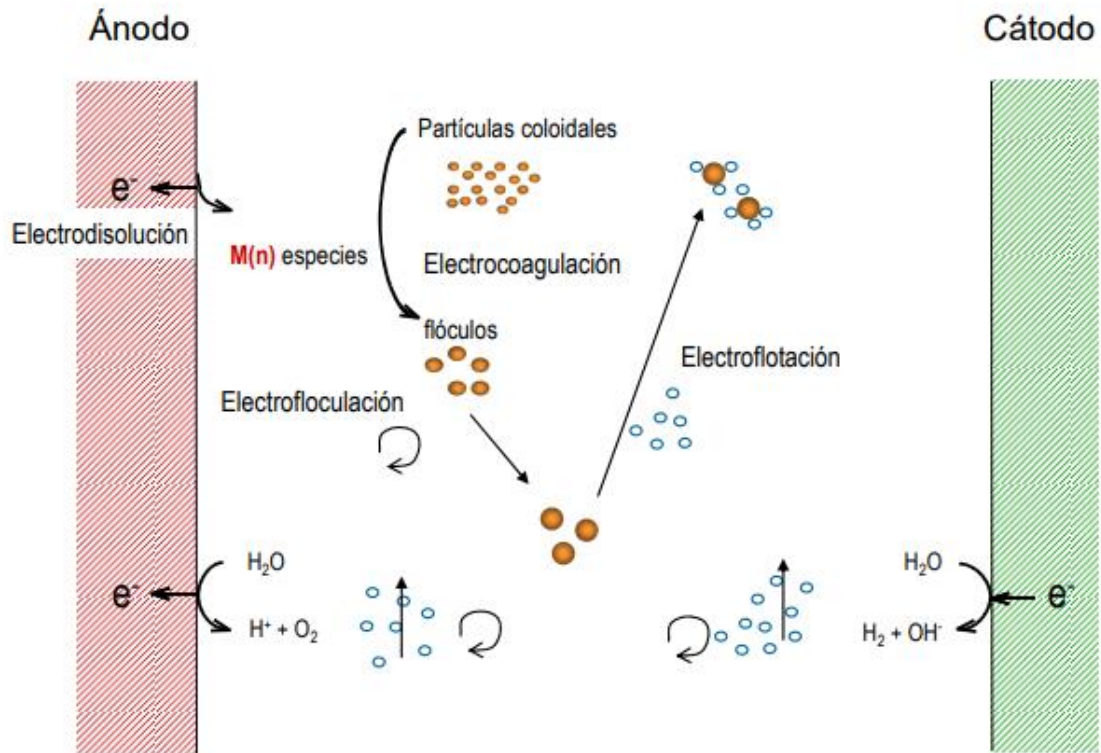
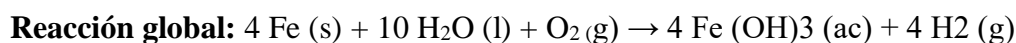
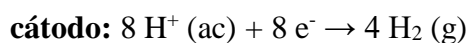
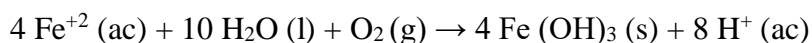
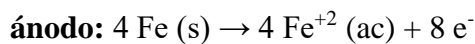


Figura 3 Procesos involucrados en un reactor de electrocoagulación (Martínez Navarro, 2019)

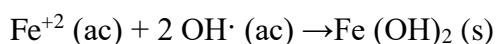
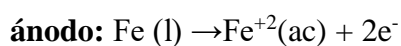
4.1.2 REACCIONES INVOLUCRADAS EN LA ELECTROCOAGULACIÓN

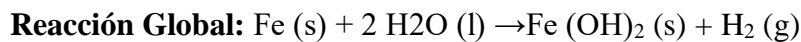
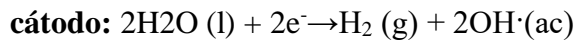
Al implementar celdas metálicas en el proceso de electrocoagulación, es muy común que el material sea fabricado a base de hierro o de aluminio, cuando se usa un ánodo de hierro se presentan dos mecanismos para la formación del coagulante mediante el hidróxido ferroso o férrico. Y también se presentan otros tipos de mecanismos cuando se usa como ánodo el aluminio.

Caso 1: Formación de Hidróxido férrico $\text{Fe}(\text{OH})_3$



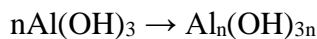
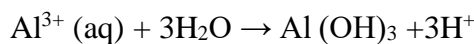
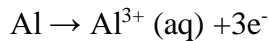
Caso 2: Formación de Hidróxido ferroso $\text{Fe}(\text{OH})_2$



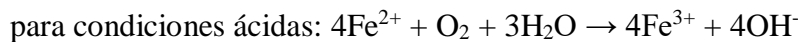
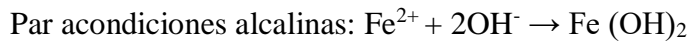
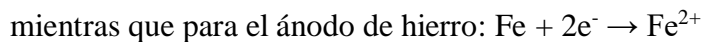
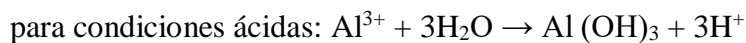
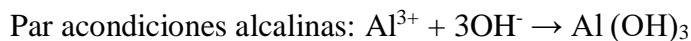
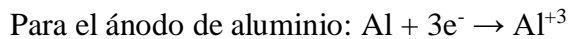


Al utilizar electrodos de hierro se espera la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_n$ y polihidróxidos como: $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_5(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})^{2+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_8(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Fe}_2(\text{H}_2\text{O})_6(\text{OH})_4^{4+}$

Mecanismo con electrodos de aluminio.



Al utilizar electrones de aluminio se forman algunas especies monoméricas $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, y otras poliméricas, tales como $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ y $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$



4.1.3 Principales contaminantes en los efluentes de agua

cuando el agua no se encuentra en su estado natural o se ve modificada su composición lo que no la hace apta para el uso que tiene asignado, se puede considerar según la OMS como agua contaminada (Redondo-Peñuela *et al.*, 2020).

La contaminación del agua se puede producir de manera natural o por intervención del hombre. El ser humano en su proceso de desarrollo e industrialización realiza actividades que tienen grandes consumos de agua y generan una gran cantidad de residuos que son los principales promotores de la contaminación que están sufriendo las fuentes hídricas de nuestro planeta ya que muchos de estos contaminantes van a parar a las fuentes hídricas cercanas (Sánchez, 2018). No es muy común la contaminación de manera natural en las fuentes hídricas, generalmente solo ocurre en ambientes que están relacionados con yacimientos minerales específicos, por otro lado las principales actividades del hombre que generan contaminación son: vertederos de

aguas residuales urbanas, explotaciones ganaderas, vertederos de aguas residuales agrícolas, vertederos industriales entre otras.

Tabla 1 Parámetros fisicoquímicos del agua

Parámetros fisicoquímicos del agua	DEFINICION
Demanda química de oxígeno (DQO)	Cantidad de oxígeno en el agua que equivalente al contenido de materia orgánica de una muestra que es susceptible a oxidación por un oxidante químico fuerte
Demanda biológica de oxígeno (DBO)	La DBO se usa como medida del contenido de la materia orgánica biodegradable; se mide por la cantidad de oxígeno requerido para su oxidación en la muestra de agua y como resultado de la acción de oxidación bioquímica aerobia.
Turbidez	La claridad del agua es importante, en la obtención de productos destinados al consumo humano. La turbidez en el agua es causada por materiales en suspensión tales como arcilla, lodos, partículas de materia orgánica o inorgánica fragmentadas finamente, coloides, compuestos orgánicos coloreados y otros microorganismos
pH	La medida del pH es una de las pruebas más importantes y frecuentes utilizadas en el análisis químico del agua. Esto se debe a que todas las fases de tratamiento del agua para suministro y residual, como la neutralización ácido-base, suavizado, precipitación, coagulación, desinfección y control de la corrosión dependen del pH.
Metales pesados	La presencia de metales en agua potable, aguas residuales, y en los cuerpos de aguas receptores, constituye un serio problema, ya que su toxicidad afecta adversamente a los seres vivos que consumen agua, a los sistemas de tratamiento de aguas residuales y a los ecosistemas.
Sólidos suspendidos totales (SST)	Se consideran sólidos todas las sustancias presentes diferentes al agua, materiales suspendidos o disueltos en el agua. Los sólidos afectan la calidad del agua de diferentes formas: aguas

	con alta concentración de sólidos disueltos; generalmente son de baja potabilidad y pueden inducir reacciones fisiológicas desfavorables en el ser humano
Grasas y aceites	Las grasas son compuestos orgánicos que se forman de carbono, hidrógeno y oxígeno, siendo la fuente más concentrada de energía en los alimentos. Pertenecen al grupo de las sustancias llamadas lípidos y vienen en forma líquida o sólida. Este tipo de contaminantes entorpecen el tratamiento químico, físico o biológico que se le realice al agua residual y deben ser eliminadas en los procesos de pretratamiento(“Extracción de Grasas y Aceites En Los Efluentes de Una Industria Automotriz,” 2010).

4.2. Identificación de los trabajos más destacados sobre el proceso de electrocoagulación

4.2.1 Estudio de EC a nivel nacional para la identificación de variables más representativas

Los estudios sobre tecnologías para el tratamiento de aguas residuales han generado un impacto positivo sobre sus aplicaciones para la remoción de sus contaminantes, en específico, la electrocoagulación, ha despertado interés en diferentes instituciones nacionales las cuales se han dado a la tarea de su estudio(Dobrosz-gómez et al., 2020).

4.2.1.1 Diseño de una celda electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de una industria láctea

En el diseño de un sistema de electrocoagulación, para el estudio del comportamiento de distintos parámetros involucrados en la eliminación de agentes contaminantes, se estableció la geometría de la celda y tipo de electrodo (aluminio y hierro) donde se evaluó la eficiencia en la remoción de contaminantes y se determinó que el electrodo de sacrificio más apropiado es el de hierro, también se observó que cuando las separaciones entre electrodos son inferiores o superiores a 10 mm, los tratamientos se hacen prolongados, debido a que no se permite un flujo normal de agua residual durante el tratamiento. Además, se estableció la forma de conexión y

adicionalmente se determinó que el voltaje con base en una densidad de 50 a 130 A/m² ha sido reportado en la bibliografía como el adecuado para obtener buenos resultados en la remoción de contaminantes (Garcés Giraldo & Ruiz Arango, 2007).

Tabla 2 Parámetros de diseño para una celda electrolítica en la industria láctea

Densidad de corriente A/m ²	Material de electrodo	Distancia entre electrodos(mm)	pH	Tiempo de residencia (minutos)	Resultado de remoción de DQO(%)
86,47	Hierro aluminio	10	4	15	72
129,73	Hierro aluminio	10	7,5	15	78
86,47	Hierro aluminio	10	4	20	75
129,73	Hierro aluminio	10	7,5	20	80

Adaptado de (Garcés Giraldo & Ruiz Arango, 2007).

Observando la tabla, podemos decir que el proceso de remoción es mas eficiente durante los 15 primeros minutos, ya que después de ese tiempo este porcentaje aumenta poco y no seria tan rentable el proceso (Garcés Giraldo & Ruiz Arango, 2007).

4.2.1.2 electrocoagulación como tratamiento para aguas residuales provenientes del proceso curtición de una curtiembre

En este estudio se realizaron ensayos para el tratamiento de aguas residuales en un reactor a escala de laboratorio tipo batch para un proceso de curtición y teñido de una curtiembre. El proceso tuvo un volumen constante, una profundidad de electrodos definida y tiempo establecido para todos los ensayos, donde determinaron la distancia optima de separación entre electrodos, el tipo de electrodo y voltaje, basándose en términos del porcentaje de remoción de Cr⁻³, para lo cual se midieron las concentraciones de los mismos antes y después del tratamiento con el fin de determinar el porcentaje de remoción de cada uno de los parámetros evaluados (Darío et al., 2012).

Tabla 3 parámetros de diseño de una celda electrocoagulación para el proceso de curtición de una curtiembre

Voltaje	Tipo de electrodo	Distancia entre electrodo (mm)	Tiempo de residencia (min)	% de remoción de cromo
10	1	5	30	98,14
10	2	5	30	95.972
15	1	5	30	99.99
15	2	5	30	88.35
20	1	5	30	92.222
20	2	5	30	91.606

Adaptado de (Darío et al., 2012).

. En la tabla 2 se observa que el voltaje influye de manera significativa en la disminución de la concentración de cromo en el efluente tratado. El material del electrodo en este caso no presenta mayor importancia debido a que ya sea de hierro o aluminio formara iones metálicos que al ser hidratados producirá hidróxidos y polihidróxidos que se encargaran de atraer partículas dispersas en la solución coloidal.

4.2.1.3 Electrocoagulación aplicada para la remoción de colorante de una solución acuosa

Las industrias como las de textiles, colorantes y farmacéuticas generalmente producen aguas residuales que contienen sales disueltas, solidos suspendidos y materia orgánica que comúnmente contiene una fracción de colorantes.

Los colorantes de origen sintético que contienen las aguas residuales de este tipo de industrias son uno de los principales contaminantes que perjudican la flora y la fauna (Bermeo Garay & Tinoco Gómez, 2016).

Para la remoción de colorante en una solución acuosa donde tratan aguas residuales sintéticas se presentaron variaciones de pH, densidad de corriente y tiempo de residencia con el fin de obtener un proceso de buen rendimiento para la eliminación de color y que presente una alta remoción de DQO.

Tabla 4 parámetros de diseño de una celda electrocoagulación para el proceso de remoción de color

pH	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo De residencia	% remoción de DQO	% Remoción de colorante
4	30.11	10	75	84.3
4	40.86	10	89	91.2
4	30.11	15	89.7	89
4	40.86	15	98.8	99.3
6	30.11	10	50	53
6	40.86	10	56	57.8
6	30.11	15	68	69.8
6	40.86	15	71	72

Adaptado de (Bermeo Garay & Tinoco Gómez, 2016).

En esta investigación el hierro fue el material utilizado en los electros de sacrificio y una distancia de separación de los electrodos de 1mm tomadas de la literatura. Se puede apreciar en la tabla 3 que un pH más alto influye de manera negativa en el proceso de separación, que a los 15 minutos es el tiempo de residencia mas adecuado para que sea más rentable el proceso y que un amento de densidad de corriente genera efectos positivos en el proceso de remoción.

4.2.2 Estudio de trabajos destacados a nivel internacional para la identificación de variables más representativas

El abastecimiento de agua potable se ha vuelto un reto complejo para la humanidad, debido al crecimiento que ha presentado la población mundial. En especial, para los países que se encuentran en vía de desarrollo, ya que las regulaciones medioambientales que se exigen no son tan estrictas y las industrias al igual que otras actividades que realiza el hombre producen aguas y desechos que afectan en gran medida las fuentes hídricas(Gallo et al., 2020).

La reutilización del agua es una medida de que ayuda a la mitigación de la problemática de desabastecimiento en el mundo y para lograrlo es necesario la implementación de tecnologías de bajo costo.

El uso de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales ha sido una alternativa que se está estudiando y llevando a cabo en varios países(Quispe Auqui, 2017).

En esta parte del trabajo se muestra una revisión bibliográfica de estudios que se realizaron en diferentes partes del mundo que van enfocados a la implementación de la electrocoagulación en los últimos años, donde se muestran las variables más representativas como lo son: densidad de corriente, tiempo de residencia, pH, tipo de electrodo.

Tabla 5 Condiciones de operación encontradas para una celda electrolítica en artículos internacionales

Autor	pH	Densidad de corriente (A/m ²)	Tiempo de residencia (min)	Tipo de electrodo	contaminante	Proceso	Distancia entre electrodos (cm)	resultados
(Amarine et al., 2020).	6.79-7.31	NR	120	aluminio	nitratos	Producción de agua potable	1.8	la eficiencia de remoción de nitratos fue entre 84,48 y 94,10, los sulfatos se eliminan por igual con los nitratos durante el tratamiento de electrocoagulación
(Technology, 2020).	4-12	10-25	0-120	Hierro y acero inoxidable	hidrocloruro de oxitetraciclina	Eliminación de productos farmacéuticos	0,5	El aumento de la densidad de corriente no mayor a 20 A/m ² y un ánodo de hierro o aluminio aumenta la eliminación de hidrocloruro de oxitetraciclina. El pH aumenta con el material del ánodo
(Elazzouzi & Elyoubi, 2020).	7,4-8,1	50-500	0-60	aluminio	DQO, DBO Y TSS	Eliminación de contaminantes de aguas residuales urbanas	3	las condiciones óptimas de funcionamiento son las siguientes, tiempo de funcionamiento de 30 min, pH inicial de 7,4 y una densidad de corriente de 200 A / m ² . para obtener remociones de DQO, DBO ₅ y TSS, que están en el rango del límite permisible para verter en el alcantarillado
(Nasrullah & Zularisam, 2020).	2-9	5-25	0-120	Acero	DQO, DBO Y SS	Tratamiento de efluentes de molinos de aceite de palma	0.5-3.5	Con un tiempo de operación de 40 min y una intensidad de corriente de 20 A/m ² se obtuvieron remociones de para DQO, DBO Y SS de 95%, 94% y 96% .
(Casaño, 2017).	10.26 - 12.68	NR	15-45	aluminio	nitrógeno	Desnitrificación de aguas residuales	0.5	Se logro obtener un porcentaje de desnitrificación del 83,509 % y se logró determinar que el voltaje óptimo de 6v y un tiempo de residencia de 45 minutos

4.3 EFECTO DE LAS VARIABLES DE PROCESO EN LA ELECTROCOAGULACIÓN

En todo proceso industrial existe el riesgo que el producto no cumpla con los estándares establecidos o requeridos, la mayoría de las veces existe una explicación clara del porque no se llegó al resultado esperado, por ejemplo, el desajuste del equipo que se esté operando, no se monitorearon las variables de proceso o la falta de experiencia del operario(Vergara, 2005).

Para un proceso de electrocoagulación es necesario conocer cómo afectan las variables de proceso que más influyen en la eficiencia de remoción del contaminante del agua que se pretenda tratar(Castañeda & Choton, 2018).

4.3.1 efecto del pH

Se ha observado en la literatura de muchos autores que el pH inicial de una solución es uno de los factores que afectan el proceso electroquímico, ya que es determinante en la efectividad que presenta la corriente sobre el proceso de solubilidad del metal. El pH presenta variaciones durante el proceso de electrocoagulación y esta variación depende del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.

un alto porcentaje de las impurezas que contienen las aguas residuales son ácidos o bases orgánicas débiles, por tanto, el valor del pH de estas aguas puede generar cambios en las propiedades de los contaminantes que se encuentran presentes(Carlos et al., 2021).

El pH puede presentar un incremento durante el tratamiento para aguas residuales ácidas, esto es atribuido al aumento de la concentración de hidrógeno molecular en la solución. En contraste, cuando se realiza tratamiento a aguas residuales alcalinas, el pH puede decrecer. Esto indica que el pH influye sobre la eficiencia del proceso dependiendo de la naturaleza del contaminante(Castro Campos & Principe Narvaez, 2018).

Por otro lado, la electrocoagulación presenta cierta capacidad de amortiguación, especialmente en medio alcalino, lo que permite evitar grandes cambios en el pH y una disminución de la

eficiencia de eliminación de contaminantes. En medios ácidos, se obtienen mayores eficiencias de eliminación (Akyol et al., 2020).

4.3.2 efecto de la densidad de corriente

La densidad de corriente es el parámetro más importante para controlar la velocidad de reacción en un reactor electrolítico, específicamente en la cinética de eliminación, haciendo que el tiempo de residencia del proceso sea menor. Al aumentar la densidad de corriente se presenta una mayor eficiencia en la remoción. La cantidad de corriente eléctrica suministrada al proceso de electrocoagulación determina la cantidad de iones de hierro o aluminio liberados por los electrodos. En general, si se aumenta la densidad de corriente en el proceso, se genera una mayor remoción del contaminante (Castañeda Silvestre & Murillo Gatica, 2019).

Si la densidad de corriente es muy elevada puede producir pérdidas al proceso como disminuir la eficiencia y aumentar el consumo energético por tanto es recomendado saber la temperatura y el pH de la solución inicial (Gallo et al., 2020).

4.3.3 efecto de la conductividad

Las aguas residuales que poseen alta conductividad eléctrica facilitan el aumento de la densidad de corriente eléctrica, no obstante, al mantener la densidad de corriente y la conductividad alta permitirá que el voltaje aplicado tienda a disminuir, lo cual se verá reflejado en el ámbito económico debido a que el consumo energético será menor (Decana, 2020).

Si las aguas residuales contienen una baja conductividad eléctrica es recomendable el uso de un electrolito de soporte que aumente la conductividad para conseguir una disminución en el potencial de la celda, lo cual también conllevará a un ahorro energético considerable (Mendes, 2019).

4.3.4 efecto de la temperatura

La temperatura es un parámetro operativo que puede reflejar sus efectos en la eficiencia de la EC para la remoción de contaminantes que contienen las aguas residuales.

Cuando se procede a aumentar la temperatura de la solución que se está tratando tiende a mejorar la transferencia de iones que se encuentran en la superficie del ánodo y/o el cátodo a la masa de la solución, lo que da como resultado una disminución de la viscosidad de la solución y lo cual genera el aumento de la difusividad.

La corriente aumenta su eficiencia a cierta temperatura dependiendo del material del electrodo y de la solución que esté tratando, haciéndose máxima en ese punto para luego disminuir. Esto es atribuido al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxidos que se forma en la superficie del electrodo (De et al., 2020).

4.3.5 efecto del tiempo de residencia

El tiempo de residencia es uno de los parámetros operativos con gran importancia en los procesos electroquímicos, esto es debido a que la formación y las concentraciones de hidróxidos metálicos que son favorecidas con el tiempo, juegan un papel muy importante en la remoción de impurezas o contaminantes como por ejemplo la eliminación de DQO, TSS, DBO, metales pesados etc. El tiempo de residencia influye sobre la cantidad de sólidos formados, de tal forma que, si el tiempo presenta un alto valor, la cantidad de sólidos generados será mayor, debido a que se favorecen los procesos de los electrodos como la floculación y precipitación de sólidos. Se da una mayor producción de gases que al liberarse, trasladan las partículas de óxido a la superficie en forma de espuma lo que promueve el crecimiento de los flóculos y su posterior precipitación (Decana, 2020).

4.3.6 efecto del material del electrodo

La correcta elección del material para el electrodo es un aspecto muy importante ya que tiene alta influencia en la rentabilidad del proceso, ya que el tipo de electrodo repercute en la selectividad y el gasto específico de energía (Mendes, 2019).

El hierro y aluminio son materiales que son usados frecuentemente en los electrodos debido a las ventajas que nos brindan es decir su bajo costo, la disponibilidad en el mercado y la buena efectividad que presentan durante el proceso. Los electrodos de aluminio generalmente son utilizados para procesos de potabilización de agua y los de hierro son utilizados en los tratamientos de aguas residuales, también se pueden utilizar otros materiales como acero, titanio, fibra de carbón, grafitos entre otros (CASAÑO, 2017).

Los electrodos metálicos se disuelven durante el proceso de EC, que ocurre con especies coagulantes e hidróxidos metálicos. La disolución del ánodo metálico se acompaña de desprendimiento de gas hidrógeno en los cátodos, las burbujas capturan y flotan los sólidos en suspensión formados y, por lo tanto, eliminan los contaminantes (CASAÑO, 2017).

4.3.7 efecto de la distancia entre electrodos

La distancia entre electrodos influye en la remoción de contaminantes. Se ha observado que cuando se hace mayor la distancia entre los electrodos, la eficiencia de remoción aumenta, esto ocurre porque se presenta una disminución del efecto electrostático en el transporte de los iones producidos en el ánodo, es decir, los iones pasan a tener un movimiento más lento y a tener una mayor oportunidad para aglomerarse y formar flóculos, facilitando una mayor remoción de contaminantes. Por otra parte, al aumentar la temperatura aumenta la eficiencia en la remoción de contaminantes porque se da un aumento en la movilidad y colisión de iones formados en el ánodo(Morín et al., 2017).

4.4 COMPARACION DE LA EC CON DIFERENTES METODOS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS

Tabla 6 ventajas y desventajas de métodos de tratamientos de aguas

Métodos de tratamientos de agua	Ventajas	Desventajas
electrocoagulación	<ul style="list-style-type: none">• La electrocoagulación cuando es aplicada en aguas residuales, requiere una menor superficie, entre un 50% a 60% menor que en sistemas biológicos.• Se cuenta con unidades compactas que son fáciles de operar, genera un consumo de energía y una producción de lodo menor que en sistemas biológicos y químicos convencionales.• Al emplear celdas de electrocoagulación no se requiere de una instalación que necesite de grandes obras civiles, en comparación con los sistemas biológicos y químicos.	<ul style="list-style-type: none">• se deben reemplazar con regularidad los electrodos empleados debido a su oxidación• Se puede presentar en algunos lugares un alto costo en la electricidad• Se puede afectar el rendimiento del ánodo al formarse una placa de óxido en este, lo que puede disminuir la eficiencia de la electrocoagulación

	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta bajos costos de inversión respecto a los sistemas biológicos y químicos • No se genera una contaminación secundaria debido a que no se aplican productos químicos, como sucede en la precipitación química. • La electrocoagulación puede ser usada en lugares donde se dificulte el acceso a energía eléctrica al emplearse el uso de un panel solar 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere una alta conductividad • Puede llegar a ser altamente corrosivo, generando subproductos posiblemente peligrosos para la salud
Coagulación-floculación	<ul style="list-style-type: none"> • las características físico-químicas y biológicas de lodos residuales obtenidos mediante coagulación natural promueven su aprovechamiento como biosólidos(Banchón et al., 2016). • La coagulación natural permite el tratamiento de efluentes industriales bajo condiciones extremas, como por ejemplo a valores de pH por encima de 12, altas concentraciones de salinidad, presencia de metales pesados y alcalinidad(Banchón et al., 2016). • los coagulantes inorgánicos son baratos y ejercen un buen efecto en la deshidratación, también(Wei et al., 2020). • Puede ser implementada en diferentes campos ejemplo como industria textil, industria petrolera, industria de la minería. 	<ul style="list-style-type: none"> • no remueve completamente la materia orgánica disuelta porque en ciertos casos la coloración del agua se mantiene(Banchón et al., 2016). • no es un buen método para concentrar productos farmacéuticos en aguas residuales (Kooijman & Houtman, 2020). • Utilizar coagulantes inorgánicos puede presentar inconvenientes, como altas dosis, sensibilidad al pH del sistema e iones metálicos residuales, que pueden resultar en toxicidad biológica(Wei et al., 2020). • Se requiere el uso de productos químicos

Ósmosis inversa	<ul style="list-style-type: none"> • producen agua altamente purificada, la cual es recomendable para la preparación alimentos • Los sistemas de osmosis inversa tienden a ocupar poco espacio • La osmosis inversa produce altas eficiencias en los procesos de desalinización de agua de mar • de mantener una buena permeabilidad al agua y tasas de rechazo muy altas para casi todos los micro contaminantes orgánicos, inorgánicos y patógenos • mejorar aún más los parámetros de salida mediante la incorporación de nanomateriales con características de transporte excepcionales. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se presentan con frecuencia la acumulación de residuos concentrados. • Consume grandes cantidades de energía. • diferencia de otros tipos de tecnologías de purificación de agua la osmosis inversa es lenta Debido a que los filtros necesitan presión para poder purificar el agua.
-----------------	---	---

5. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

En este estudio se logró evidenciar que, para tratamientos de aguas residuales, la técnica de electrocoagulación tendrá diferentes diseños que dependen de la naturaleza del agua que se pretenda tratar. Por este motivo, se han venido realizando diferentes estudios para la implementación de esta técnica en las diferentes industrias, tanto a nivel local como a nivel internacional, que buscan altas eficiencias en la remoción de contaminantes de las aguas residuales que estas industrias generan.

En los estudios que se revisaron en la sección 4 se prestaron casos de aguas residuales tanto a nivel industriales como a nivel doméstico en las que se pueden resaltar la industria láctea, agrícola, textil, minera, química, alimentaria donde se presentan remociones de DBO, DQO, TSS, metales pesados, sólidos suspendidos, nitratos, color, grasas y aceites, en las cuales el proceso de electrocoagulación mostro altas eficiencias en la remoción de impurezas y contaminantes, por este motivo se puede decir que la EC es un proceso rentable y competitivo que debería seguir estudiándose e implementándose para el beneficio de los seres vivos y nuestro planeta.

En las condiciones de operación se pudo evidenciar que el material de electrodo y la distancia entre estos son parámetros de mucha importancia ya que el tipo de material puede impactar de manera significativa en la viabilidad económica del proceso por la selectividad que puede tener el material y el gasto energético que puede generar, en cuanto a la distancia puede intervenir en el transporte de los iones del ánodo, de igual manera ocurre con la densidad de corriente, ya que las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los que tienen un mayor porcentaje de influencia para la remoción del materiales contaminantes presentes en el agua residual, por tanto si la densidad de corriente es alta también lo será la eficiencia de la corriente pero teniendo en cuenta que un aumento excesivo puede repercutir de manera negativa disminuyendo la eficiencia del proceso y elevando el consumo energético, lo cual puede generar la sobre saturación de hidróxidos metálicos en el sistema y el aumento de la velocidad de desgaste del ánodo, para evitar que ocurran esos efectos negativos es necesario tener el conocimiento previo de las propiedades fisicoquímicas del efluente como el pH que puede alterar la carga superficial de las partículas que se pretenda tratar y la temperatura que puede facilitar la transferencia de iones que se encuentran en la superficie del ánodo y catodo a la masa de la solución.

La implementación de la EC como técnica alternativa promete grandes avances frente a los tratamientos convencionales que utilizan sustancias químicas ya que una de las ventajas de este método es que no genera contaminación secundaria y presenta bajos costos en comparación los métodos convencionales según lo observado en la literatura , pero a pesar de estos y las altas eficiencias de la electrocoagulación sigue siendo un método que se debe de seguir investigado por las limitaciones de su implementación a gran escala y la falta de un procedimiento sistemático en la operación que reduzca el problema de la pasivación de los electrodos .

6. CONCLUSIONES

En la revisión de trabajos que se realizaron en Colombia y otras partes del mundo se pudo evidenciar que la electrocoagulación debido a sus altas eficiencias es una técnica que puede contribuir a la mitigación del daño ecológico que está sufriendo nuestro planeta, ya que esta no necesita de sustancias químicas para realizar su proceso de remoción de contaminantes, debido a su aplicación de la energía para la generación in situ del agente coagulante, sin embargo esta técnica debe seguir siendo materia de investigación a nivel nacional e internacional ya que presenta algunas falencias que no permiten su aplicación a gran escala.

La electrocoagulación debido a sus ventajas puede presentarse como una técnica prometedora por los amplios campos de acción donde esta puede ser implementada, algunas de las industrias donde puede ser utilizada son la potabilización de agua, la remoción de metales pesados, industria textil, agrícola y láctea entre otras, dando como resultado altas eficiencias y cero contaminaciones por químicos como los que puede generar la coagulación-floculación.

Cabe recalcar que los procesos de EC deben ir acompañados de otros tratamientos para cumplir con las demandas requeridas.

En la configuración de reactor electrolítico donde se realizara un proceso de electrocoagulación se pudo denotar que para un óptimo tratamiento, las variables de mayor influencia son la densidad de corriente, la distancia entre electrodos, el material del electrodo

y el tiempo de residencia los cuales a su vez dependerán del efluente al que se le realizara el respectivo proceso, teniendo en cuenta que las propiedades fisicoquímicas como el pH, cantidad de metales pesados, turbiedad entre otros no son iguales para todas las aguas residuales por ende no todas las configuraciones del reactor electrolítico se realizaran de la misma manera.

7. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda seguir investigando este proceso de remoción de contaminantes ya que puede ser un gran aporte para la humanidad por sus beneficios ecológicos y por el gran aporte que puede dar en cuanto a la mitigación del impacto ambiental

Investigar muy de cerca las variables como la densidad de corriente y el voltaje aplicado ya que estas tienen mucha influencia en la eficiencia de remoción de contaminantes

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akyol, A., Can, O. T., & Bayramoglu, M. (2020). *Tratamiento de hidroquinona por oxidación fotoquímica y proceso combinado de*. 8, 1–18.
- Alaya Esparraga, S. R., & Barboza Elera, E. A. (2018). *Análisis de la eficiencia del proceso electroquímico para el tratamiento de las aguas residuales en la PTAR Jaen, Cajamarca, 2017*.
- Alzahrani, F., Collins, A. R., & Erfanian, E. (2020). Drinking water quality impacts on health care expenditures in the United States. *Water Resources and Economics*, June, 100162. <https://doi.org/10.1016/j.wre.2020.100162>
- Amarine, M., Lekhlif, B., Mliji, E. M., & Echaabi, J. (2020). Nitrate removal from groundwater in Casablanca region (Morocco) by electrocoagulation. *Groundwater for Sustainable Development*, 11(March), 100452. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100452>
- Banchón, C., Baquerizo, R., Muñoz, D., & Zambrano, L. (2016). Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales. *Enfoque UTE*, 7(4), 111–126. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n4.118>
- Bermeo Garay, M., & Tinoco Gómez, O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada. *Industrial Data*, 19(2), 91. <https://doi.org/10.15381/idata.v19i2.12844>
- Carlos, E., Coimbra, L., & Mounteer, A. H. (2021). *Electrocoagulación de filtrados de blanqueo de pulpa kraft para mejorar la biotratabilidad*. 147, 1–21.
- CASAÑO, I. (2017). Universidad Nacional Del Centro Del Peru. *Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado*, 118.
- Castañeda, D., & Choton, E. (2018). *Estudio de la densidad de corriente y tiempo de residencia en el proceso de electrocoagulación y su influencia en la reducción Fe²⁺ de solución de drenaje ácido de mina*. 78.
- Castañeda Silvestre, M. A., & Murillo Gatica, Z. S. (2019). Influencia De La Densidad De Corriente Y Peroxido De Hidrógeno En La Remocion De Color De Efluentes De Recurtido Mediante Electrocoagulación. *Universidad Nacional De Trujillo*, 83.
- Castro Campos, J., & Principe Narvaez, D. (2018). *Influencia Del Ph, Densidad De Corriente Y Tiempo En La Remocion De Cadmio (Ii) Y Cobre (Ii) Presentes En Soluciones Acuosas Aplicando Electrocoagulación*. Ii, 64. http://www.dspace.unitru.edu.pe/bitstream/handle/UNITRU/11442/CastroCampos_J - PrincipeNarvaez_D.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Darío, E., Luz, A., Sierra, M., White, C., Catalina, L., & Amézquita, O. (2012). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. *Cuadernos de Investigación*, 0(65).
- De, R., Ii, N., & Rojas-vargas, A. (2020). *Introducción*. 40(2), 393–412.
- Decana, P. (2020). *Universidad Nacional Mayor de San Marcos “ Tratamiento de agua residual procedente de lavadoras por el método de electrocoagulación para la reutilización en riego de vegetales - Ate Vitarte ” Para optar el Grado Académico de Magíster en Gestión Integrada*.
- Dobrosz-gómez, I., Gómez-garcía, M. Á., & Ibarra-táquez, H. N. (2020). *Tratamiento de aguas residuales de la industria del café soluble vía Electrocoagulación - Oxidación Anódica . Selección de los electrodos The treatment of industrial wastewater originated from soluble coffee production via electrocoagulation - anodic oxid*. 1–17.
- Elazzouzi, M., & Elyoubi, M. S. (2020). *La floculación por electrocoagulación como proceso*

de bajo costo para la eliminación de contaminantes de las aguas residuales urbanas. 1–22.

- Extracción de Grasas y Aceites en los Efluentes de una Industria Automotriz. (2010). *Conciencia Tecnológica*, 40, 29–34.
- Feria Diaz, J. J., Escobar Aguado, A. E., & Martinez, J. A. (2014). Tratamiento de aguas residuales de origen químico mediante electrocoagulación. *Avances Investigación En Ingeniería*, 11(1), 65. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.332>
- Gallo, P. R., E, F. D. E. I. Q., Alimentarias, I., & Pedro, U. N. (2020). *Escuela Profesional de Ingeniería Química*. 1–94.
- Garcés Giraldo, L. F., & Ruiz Arango, A. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad EAFIT*, 43(147), 56–67. <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/764/672>
- Gonzalo Morante, G. (2002). Electrocoagulación De Aguas Residuales. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(2), 160.
- Kooijman, G., & Houtman, C. (2020). *Perspectivas de la coagulación / floculación para la eliminación de productos farmacéuticos de las aguas residuales domésticas : una visión crítica de los procedimientos experimentales.* 34, 1–15.
- La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. (2005). *Revista Lasallista de Investigación*, 2(1), 49–56.
- Martinez Navarro, F. (2019). Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional. In *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* (Vol. 10, Issue 4).
- Mayta, R., & Mayta, J. (2017). Remoción De Cromo Y Demanda Química De Oxígeno De Aguas Residuales De Curtiembre Por Electrocoagulación. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, 83(3), 331–340. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i3.117>
- Mendes, L. (2019). *Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación acoplada a un MBR para minimizar el ensuciamiento de la membrana y obtener efluentes de alta.* 3. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/90307/1/tesis_lyvia_mendes_predolin.pdf%0A <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/90307>
- Moradi, M., Vasseghian, Y., Arabzade, H., & Khaneghah, A. M. (2021). *Tratamiento de diversas aguas residuales mediante el proceso de sono- electrocoagulación : una revisión integral de los parámetros operativos y perspectivas futuras.* 1–41.
- Morín, B., Arturo, M., Soto, B., & Neyld, O. (2017). *lio te ca In g ría Am bi en ta lio te ca de Bi In g en ie ría Am bi en ta l.*
- Moya, J. (2011). *Tecnologías Electroquímicas en el Tratamiento de Aguas: Electrocoagulación.* 8.
- Nasrullah, M., & Zularisam, A. W. (2020). *Proceso de electrocoagulación de alto rendimiento en el tratamiento de efluentes de molinos de aceite de palma utilizando una aplicación de alta intensidad de corriente* ☆. 27(1), 1–19.
- Nguyen, X. C., Nguyen, D. D., Tran, Q. B., Nguyen, T. T. H., Tran, T. K. A., Tran, T. C. P., Nguyen, T. H. G., Tran, T. N. T., La, D. D., Chang, S. W., Balasubramani, R., Chung, W. J., Yoon, Y. S., & Nguyen, V. K. (2020). Two-step system consisting of novel vertical flow and free water surface constructed wetland for effective sewage treatment and reuse. *Bioresource Technology*, 306(February), 123095. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123095>
- Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C. A., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A., & García-Espinoza, J. E. (2011). Review of design variables and operation conditions in electrocoagulation. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 257–271.

- Prieto García, F., Callejas Hernández, J., Reyes Cruz, V., & Marmolejo Santillán, Y. (2012). Electrocoagulación: Una Alternativa Para Depuración De Lactosuero Residual. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*, 5(3), 51–77.
- Quispe Auqui, J. V. (2017). Facultad de Ingeniería Facultad de Ingeniería. *Ucv*, 68. <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303><http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/32303>
- Redondo-peñuela, E. A., Zafra-mejía, C. A., & Rodríguez-, J. P. (2020). *Análisis de series de tiempo de parámetros fisicoquímicos para estudiar el funcionamiento de una potabilizadora Time series analysis of physicochemical parameters to study the functioning of a water treatment plant*. 18.
- Sánchez, W. (2018). *Deficiencias de la legislación ambiental para establecer responsabilidad administrativa del ciudadano por la contaminación del agua del Río Mashcón – Cajamarca (2013- 2017)*. 1–83.
- Technology, P. (2020). *Eliminación de productos farmacéuticos del agua con un proceso de electrocoagulación ; efecto de varios parámetros y estudios de isoterma y cinética*. 188, 1–32.
- Vergara, P. (2005). *Optimización de Procesos Industriales y Control de Calidad*. Pedro Vergara Vera. I.S.B.N: 956-7359-45-8. Ediciones Universidad Tecnológica (Issue January 2005).
- Wei, H., Gao, B., Ren, J., Li, A., & Yang, H. (2020). *Coagulación / floculación en la deshidratación de lodos: una revisión ☆*. 143, 1–60.

9. ANEXOS