

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DE AGUAS CONTAMINADAS CON FENOLES MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN

EFFICIENCY EVALUATION OF ELECTROCOAGULATION
PROCESSES FOR THE TREATMENT OF
PHENOL-POLLUTED WATER

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA NO TRATAMENTO
DE ÁGUAS POLUÍDAS COM COMPOSTOS
FENÓLICOS USANDO ELETROCOAGULAÇÃO

Milena Ortiz^a
Adriana Niño^b
Gonzalo Forero^c

^a Facultad de ingenierías, Maestría en Tecnologías
para el Manejo de Aguas y Residuos, Manuela
Beltrán, ixhel_milena_379@hotmail.com

^b Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle

^c Facultad de Ingeniería, grupo de
investigación Choc lzone, Universidad el
Bosque, gforerob@unbosque.edu.co

Resumen— La electrocoagulación es una tecnología ampliamente utilizada en el tratamiento de aguas residuales, para la remoción de diferentes contaminantes como grasas, metales y moléculas orgánicas. En el presente trabajo se ha realizado un estudio exhaustivo de las técnicas de electrocoagulación aplicadas a remoción de fenoles, analizando diferentes parámetros de control como pH, concentración inicial del contaminante, densidad de corriente, tipo de electrodos y su influencia en la eficiencia del proceso. Los diferentes trabajos desarrollados muestran remociones entre el 45,7 y el 100% de fenol bajo condiciones óptimas de operación. Se concluye que la densidad de la corriente, el pH, la concentración del contaminante, el tiempo del tratamiento, la agitación, el material de los electrodos y la distancia entre ellos; son parámetros que influyen de manera directa en el tratamiento del agua por medio de la electrocoagulación, siendo la densidad de corriente el parámetro más determinante en la eficiencia del sistema.

Palabras clave— electrocoagulación, compuestos fenólicos, eficiencia de eliminación del contaminante.

Abstract— Electrocoagulation is a technology widely used in wastewater treatment to remove several pollutants like grease, metals, and organic molecules. This paper presents the result of exhaustive studies of electrocoagulation techniques applied to phenols removal, studying different control parameters such as pH, initial concentration of contaminants, electric current density, electrode types to establish their influence in the process efficiency. The different tests developed show phenol removals between 45,7% and 100% under optimum operating conditions. As a conclusion, the electric current density, the pH, the phenol concentration, the treatment time, the agitation, the material of the electrodes and the distance between them are parameters which affect directly the water treatment through electrocoagulation, nevertheless, the electric current density is the most determinant parameter in the system efficiency.

Keywords— electrocoagulation, phenolic compounds, pollutant removal efficiency.

Resumo— A eletrocoagulação é uma tecnologia altamente usada em tratamento de esgotos para a remoção de diferentes poluentes como óleos, metais e compostos orgânicos. Este trabalho apresenta um estudo das técnicas de eletrocoagulação para remoção de compostos fenólicos, analisando parâmetros como pH, concentração inicial de poluente, densidade de corrente, eletrodos e a sua influência na eficiência no tratamento de água. Os estudos mostram remoções entre 45,7 y el 100% de fenol em condições ótimas de operação. Segundo o revisado na literatura, a densidade de corrente, o pH, a concentração do poluente, o tempo de tratamento, a agitação, o material dos eletrodos e a distância entre eles são parâmetros que tem um efeito direto no tratamento, embora, a densidade de corrente é o parâmetro mais determinante na eficiência do sistema.

Palavras chave— eletrocoagulação, compostos fenólicos, eficiência de remoção de poluentes.

I. INTRODUCCIÓN

El uso de la electricidad en plantas se conoce desde el siglo XIX en Inglaterra y a inicios del siglo XX en los Estados Unidos tanto para potabilización como para tratamiento de agua residual [1, 2]. A partir de ese momento se han investigado y desarrollado diferentes técnicas electroquímicas para el tratamiento de efluentes con presencia de metales pesados y otros componentes orgánicos. Las técnicas electroquímicas más conocidas son: electrodiálisis, electrocoagulación, electroflotación y la oxidación directa o indirecta; usadas en la industria metalúrgica, en la fabricación de pilas y en el tratamiento de aguas residuales y efluentes gaseosos [3].

La electrocoagulación es un proceso donde son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales [4, 5, 6 y 7]. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos

metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados [8]. En este proceso, el tratamiento se lleva a cabo sin la adición de coagulantes o coadyuvantes.

La electrocoagulación es reconocida en el tratamiento de agua contaminada de varios orígenes al ser un método relativamente simple de operar, permitir la remoción simultánea de un amplio rango de contaminantes; no requerir el uso de sustancias químicas (lo que reduce la posibilidad de contaminación secundaria); producir pocos lodos y de fácil tratamiento [1]; además de la compatibilidad ambiental, el rendimiento, la versatilidad, la seguridad y los bajos costos operacionales asociados a este tratamiento. Sin embargo, la tecnología requiere reposición de los electrodos de sacrificio, mantenimiento continuo y los lodos generados contienen concentraciones importantes de metales como hierro y aluminio, dependiendo del material utilizado [1].

Algunos estudios muestran resultados positivos en la disminución de DQO (con eficiencias entre el 43 y 94%), color, turbidez, nitrógeno total, nitratos, sólidos suspendidos totales, grasas, aceites, hidrocarburos, tintas, cromo hexavalente, fosfatos, fluoruros y arsénicos [1, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19]; siendo una tecnología eficiente para el tratamiento de aguas residuales municipales e industriales y la potabilización de agua [20].

En la electrocoagulación, las partículas en una solución son desestabilizadas por

medio de una corriente eléctrica aplicada a través de placas metálicas ubicadas en paralelo, llamadas electrodos (ver figura 1), las cuales favorecen la neutralización de cargas y la formación de agregados para ser fácilmente removidos [1]. Así, el sistema de electrocoagulación actúa como una celda electrolítica que requiere de una fuente de potencia externa. El ánodo se conecta al polo positivo de la fuente y el cátodo al polo negativo [21]. Las reacciones electroquímicas en la solución acuosa ocurren a causa del flujo de electrones entre los electrodos metálicos, generando los procesos de reducción en el cátodo y de oxidación en el ánodo [22].

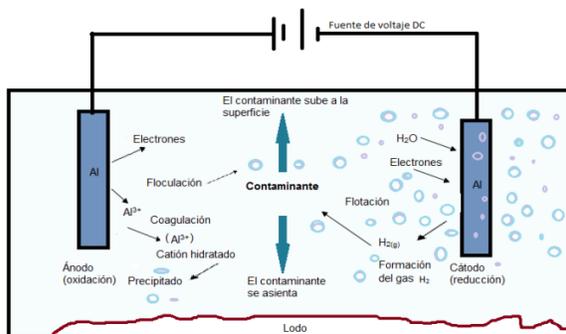


Fig. 1. Sistema de electrocoagulación
Fuente: Hernández [23]

En la electrocoagulación, las especies de coagulantes son generadas in situ mediante la disolución eléctrica de un ánodo de sacrificio. Generalmente, el ánodo de sacrificio se oxida por la acción de la corriente eléctrica, formando iones metálicos que se disuelven en la solución. La intensidad de la corriente influye en la velocidad de dosificación del coagulante a medida que se va gastando el ánodo; los metales contenidos en él terminan formando parte de los lodos al final del proceso [3].

Por otro lado, el fenol es un reactivo inflamable, altamente corrosivo, utilizado en la industria de explosivos, fertilizantes, pinturas, plásticos, caucho, textiles, adhesivos, drogas, papel, jabones, reveladores fotográficos, inmunizantes para madera, quitaesmaltes, lacas, tinta, perfumes y juguetes [24 y 25].

Por la alta solubilidad relativa del fenol en agua con respecto al aire (0,067g/ml a 16°C) y su baja volatilidad a temperatura ambiente (se evapora con mayor lentitud que el agua), se espera que el fenol se distribuya mayoritariamente en el agua. Los efectos agudos letales más importantes observados en especies de agua dulce después de la exposición a fenol incluyen: daño en las branquias, el hígado, los riñones y los intestinos, velocidad reducida del corazón e inhibición del crecimiento en invertebrados [26]. Cuando el fenol reacciona con ácido nitroso en aguas residuales puede llegar a formar cianuros [8], una sustancia extremadamente tóxica que en concentraciones superiores a 200 microgramos por litro de agua es mortal para cualquier especie [27]

[28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 y 37] estudian la remoción de fenol en aguas residuales a través de métodos de electrocoagulación. Eficiencias de remoción de fenol entre 45,7 y 100% fueron logradas en los artículos anteriormente mencionados. La eliminación máxima de los compuestos fenólicos es alcanzada por Ashtouky, Taweel y Abdel [35] en el artículo: Treatment of petrochemical wastewater containing phenolic compounds by electrocoagulation using a fixed bed

electrochemical reactor, en condiciones de pH igual a 7, densidad de corriente de 8,59 mA/cm², temperatura de 25 °C, un tiempo de reacción de 1,5 horas y una concentración inicial de fenol de 3 mg/L.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La revisión bibliográfica se realizó utilizando diversas bases de datos y bajo un riguroso estudio científico sobre la evolución de los sistemas de electrocoagulación para remoción de fenoles en la última década. Las investigaciones que se tomaron como base para este trabajo provienen en un 86,2% de estudios realizados y en un 12,5% de artículos de revisión.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A) Efecto de concentración inicial de fenol en el tratamiento de aguas

[29, 32 y 37] evalúan el efecto de la concentración inicial de fenol en el proceso de electrocoagulación. Todos los artículos concluyen que, a concentraciones más bajas de contaminante, mayor es la eficiencia de remoción. Esto ocurre ya que, a mayor concentración de contaminante, menor es la velocidad de sedimentación del contaminante [1], afectando la eficiencia del proceso.

B) Efecto del pH en el proceso de electrocoagulación para remoción de fenoles

El pH influye de manera directa sobre la eficiencia de los procesos de electrocoagulación, ya que este

parámetro afecta la conductividad de la solución y mejora la disolución del electrodo para formar los hidroxilos metálicos [38].

Cuando son utilizados ánodos de aluminio y hierro y la solución es muy ácida, los hidroxilos de hierro y aluminio suelen no ser efectivos debido a su baja estabilidad. Igualmente, en condiciones altamente alcalinas se forman iones que tienen un bajo rendimiento de coagulación [15]. Con pH neutro, el consumo de energía puede incrementar debido a la disminución de la conductividad cuando no hay presencia de electrolitos en la solución. Cuando hay presencia de electrolitos y la conductividad es alta, el efecto del pH no es significativo sobre el consumo eléctrico.

[28, 29, 32 y 37] estudiaron el efecto del pH sobre el porcentaje de remoción de fenol, encontrando en la mayoría de los casos mayores eficiencias a pH básicos. Lo anterior debido a que los electrodos de aluminio se comportan como un neutralizador del pH [38], haciendo que el pH tienda a incrementar cuando el pH de la solución inicial es ácido y a decrecer cuando es alcalino [39], afectando de manera directa la eficiencia de la corriente en el proceso [30]. Solo [28 y 37] obtienen mayores eficiencias de remoción a pH 2 y 3, respectivamente.

[28, 32 y 35] hacen uso de NaCl con el propósito de incrementar la conductividad del agua para optimizar el proceso de electrocoagulación. La conductividad de la solución depende del número de iones presentes en esta. El aumento de

la conductividad eléctrica provoca un aumento en la densidad de corriente, lo que, como se menciona en la siguiente sección, resulta en mayores eficiencias de remoción.

C) Efecto de la configuración eléctrica del sistema en la remoción de fenoles

La densidad de corriente determina la cantidad de metal que se libera en el sistema [1]. La densidad de la corriente y la remoción de contaminante son variables directamente proporcionales. Altos valores de densidad de corriente favorecen la generación de burbujas que afectan la agitación de la solución y la transferencia de masa en la superficie de los electrodos, promoviendo fenómenos de flotación [40]. Sin embargo, una densidad de corriente demasiado alta produce la disminución de la eficiencia del proceso, por lo cual se recomienda el uso de densidades de corriente inferiores a 20 mA/cm² [39 y 41].

En los artículos consultados se trabajaron densidades de corriente entre 1 y 40 mA/cm².

Todos los autores concuerdan en que, a mayores densidades de corriente se obtienen mayores eficiencias de remoción y concluyen que este es el factor más determinante en el tratamiento del agua por este método. A pesar de que las condiciones operacionales son completamente diferentes en todos los casos, [28, 32, 33 y 36] coinciden en un valor de 25 mA/cm² para la obtención de mayores eficiencias de remoción de fenol mediante el proceso de

electrocoagulación. [42] menciona que es importante evitar la aplicación de altas densidades de corriente que produzcan pasivación de ánodos. La pasivación de los ánodos se produce por la formación de una capa de iones que impiden la disolución anódica de algunas sustancias, ya que se adhieren a la superficie de los cátodos impidiendo la circulación de la corriente por la celda. Además, cuando se excede la densidad de corriente pueden ocurrir reacciones indeseadas como las hidrólisis del agua [3], la cual genera sobrecosto energético.

Para poder explicar el proceso de electrocoagulación, se revisará al detalle el ejemplo de la electrólisis en movimiento, la cual se asemeja al proceso de electrocoagulación en aguas residuales.

En el agua destilada o con una baja conductividad, no es posible inducir dentro de ella una corriente eléctrica, para lo cual es necesario añadir ácido, como ácido sulfúrico H₂SO₄.

Mientras el proceso de electrólisis prosigue, se libera gas oxígeno y gas hidrógeno, los iones de hidrógeno con carga negativa migran hacia el electrodo positivo y los iones de oxígeno, con carga positiva, hacia el electrodo negativo. Estos gases liberados proceden del ácido añadido, debido a que el ácido sulfúrico está formado por dos átomos de hidrógeno, un átomo de azufre y cuatro átomos de oxígeno, de manera que el componente original ha sido separado en sus elementos principales haciéndose así una separación en los elementos básicos de la sustancia

presente en el agua, en este caso el ácido, de manera que posterior a este proceso, estos elementos son separados por su densidad con respecto al agua que lo rodea, donde flotarían los más livianos y se decantarían los más pesados.

De la misma forma, el fenol, compuesto de carbono, hidrógeno y oxígeno, será separado en gas oxígeno con carga positiva que viaja hacia el electrodo negativo y gas hidrógeno con carga negativa que viaja hacia el electrodo positivo y así sucesivamente por cargas eléctricas y densidades de los distintos componentes del fenol o que acompañen en su estructura molecular serán separados por el proceso de electrocoagulación de agua residual industrial de acuerdo con su polaridad y densidad.

D) Efecto del tiempo de reacción y tipo de agitación

En los diferentes estudios sobre remoción de fenol con electrocoagulación, el tiempo es un parámetro y no una variable de estudio. En los artículos analizados, se establecen tiempos de tratamiento entre 20 y 180 minutos. Es preciso considerar que a pesar de que existe una relación directa entre el tiempo y la eficiencia de la electrocoagulación debido a que se proporciona un mayor tiempo de contacto entre los coagulantes y los contaminantes [43], favoreciendo la remoción de estos últimos, el coagulante generado pierde capacidad de absorción con el tiempo [44]. Por lo anterior, es necesario establecer por medio de experimentación

los tiempos óptimos para el proceso de electrocoagulación en determinados sistemas.

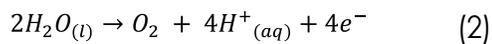
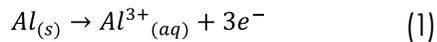
Con respecto a la velocidad de agitación, se ha encontrado que el aumento de la energía cinética dentro del sistema propicia una mayor interacción entre iones, lo que facilita el transporte iónico dentro del proceso y por tanto, la eliminación de contaminantes. [6, 28, 29, 30, 31 y 32] mostraron este efecto con agitaciones mecánicas entre 150 y 3500 rpm.

E) Efecto de los electrodos en la remoción del contaminante

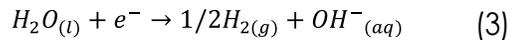
Los electrodos proveen iones encargados del proceso de eliminación del contaminante, haciendo que el material del electrodo determine en gran medida la efectividad de la técnica [45]. Algunos materiales utilizados como electrodos en el proceso de electrocoagulación son: plata, aluminio, calcio, cadmio, cesio, hierro, magnesio, silicio y cinc [46]; siendo los más utilizados: el aluminio como ánodo y el hierro como cátodo, debido a la alta eficiencia, fácil acceso y bajo costo, aunque en el caso del hierro aporte color al agua. Es preciso mencionar que los iones multivalentes son reconocidos como coagulantes superiores [47].

En caso de que se utilice aluminio como electrodo de sacrificio, las reacciones en el ánodo y el cátodo son las que se presentan en las ecuaciones 1, 2 y 3:

Reacciones en el ánodo:



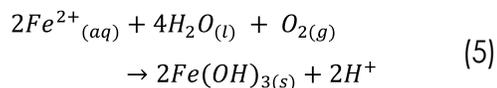
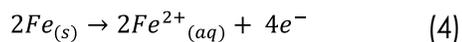
Reacciones en el cátodo:



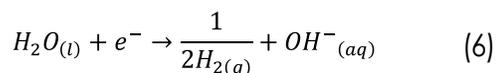
Después las especies de Al^{3+} y los iones OH^{-} en disolución pueden reaccionar y formar especies mono-nucleares como $Al(OH)_2^{+}$, $Al(OH)_2^{+}$ y especies polinucleares como $Al_6(OH)_{15}^{3+}$, $Al_7(OH)_{17}^{4+}$, $Al_8(OH)_{20}^{4+}$, finalmente estas especies pueden ser transformadas en $Al(OH)_3$, el cual facilita la adsorción de compuestos orgánicos solubles y atrapa partículas coloidales [23].

Las ecuaciones 4, 5 y 6 son las principales reacciones cuando son utilizados electrodos de hierro:

Reacciones en el ánodo:



Reacciones en el cátodo:



$Fe(OH)_n$ y polihidróxidos como: $Fe(H_2O)_6^{3+}$, $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$, $Fe(H_2O)_4(OH)_2^{+}$,

$Fe_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$ y $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{4+}$ se forman cuando se utilizan electrodos de hierro [23].

Además del material de los electrodos, la distancia entre ellos también es un parámetro que incide en la eficiencia del proceso debido al aumento de la resistencia eléctrica del flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo. Como lo establece la ley de Ohm (potencial eléctrico = corriente x resistencia), el aumento de la resistencia aumenta el potencial entre los electrodos [15]. Así, el aumento del espacio entre electrodos resulta ser inversamente proporcional a la velocidad de remoción de los contaminantes [1], reduciendo la eficiencia y aumentando los costos del tratamiento. Se evidencian distancias entre 0,4 cm y 2 cm en los artículos consultados.

El área de contacto influye de manera directa en la eficiencia del proceso. Entre mayor sea el área efectiva, mayor será la eficiencia de remoción del contaminante [48]. Esta afirmación se estudia en el artículo "Removal of phenolic compounds from oil refinery wastewater by electrocoagulation and Fenton/photo-Fenton processes", donde la posición horizontal de los electrodos, sobre la vertical, aumenta la eliminación total de fenoles al 42%.

Otros aspectos importantes tratados en los artículos estudiados son: la disminución de la cantidad del lodo generado [49,50], la calidad del lodo producido en el tratamiento (más compacto respecto a un lodo tratado

fisicoquímica o biológicamente) [13], el cálculo del consumo de energía de la electrocoagulación, el cual demuestra no ser elevado, y el cumplimiento respecto a la normatividad ambiental [25].

IV. CONCLUSIONES

La electrocoagulación es una tecnología eficiente para el tratamiento de diversos tipos de aguas y tiene una alta eficiencia en la remoción de contaminantes persistentes de origen mineral y orgánico.

Algunos parámetros que influyen en la eficiencia del proceso son: el pH, la concentración del contaminante, el tiempo del tratamiento, la agitación, el material de los electrodos y la distancia entre ellos.

De acuerdo con los estudios analizados, los sistemas de electrocoagulación alcanzan remociones de fenol entre el 45,7 y el 100% cuando se trabaja con tiempos de tratamiento entre 20 y 180 minutos, agitaciones mecánicas entre 150 y 3500 rpm, soluciones con pH cercanos a 7 y distancias entre electrodos de 0,4 cm y 2 cm. La eficiencia del tratamiento por medio de electrocoagulación también dependerá de las dimensiones del equipo, el tamaño de las placas y el tipo de material de los electrodos.

Dentro de las ventajas de la tecnología se encuentran el no requerir uso de sustancias químicas, producir pocos lodos y de fácil tratamiento, requerir mantenimiento mínimo y lograr el ahorro de costos en el tratamiento del agua.

Cualquier contaminante industrial, que pueda inducir una carga eléctrica en el agua, puede ser separado en elementos con carga positiva que viajan hacia el electrodo negativo y elementos con carga negativa que viajan hacia el electrodo positivo, de esta forma, cualquier contaminante puede ser separado del agua mediante el proceso de electrocoagulación de agua residual industrial, ya que después de este proceso puede seguir tres vías: 1. Añadirse a la placa del cátodo o al ánodo, 2. Flotar en la superficie del agua 3. Decantarse; al seguir estas rutas, ya puede ser separado por medios físicos.

Se hace necesario investigar y probar esta tecnología en los residuos industriales de todo tipo para la separación y reúso de los elementos industriales recuperables, separados por la electrocoagulación para aumentar el ahorro de costos de producción en industrias a la vez que se disminuye la contaminación al conseguir la optimización del proceso.

REFERENCIAS

- [1] Correa, M., Cuesta, D., Hernández, A. y Yepes, L. (2019). Electrocoagulación en la remoción de contaminantes de efluentes provenientes de fertilizantes nitrogenados. *Revista de Investigación*. 11:109-39. doi: 10.29097/2011-639X.233.
- [2] Hakizimana, N., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P. y Naja, J. (2017). Electrocoagulation Process in Water Treatment: A Review of Electrocoagulation Modeling

- Approaches. *Desalination*, 404:1-21. doi: 10.1016/j.desal.2016.10.011.
- [3] Gilpavas, E. (2012). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. *Revistas académicas. Universidad EAFIT*. Recuperado de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos-investigacion/article/view/1279>
- [4] Graça, S., Ribeiro, A. y Rodrigues, A. (2019). Modeling the Electrocoagulation Process for the Treatment of Contaminated Water. *Chemical Engineering Science*, 197:379-85. doi: 10.1016/j.ces.2018.12.038.
- [5] Morales, N., y Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1):33. doi: 10.18359/rcin.282.
- [6] Azerrad, S., Mor, I. y Dosoretz, G. (2019). Integrated Treatment of Reverse Osmosis Brines Coupling Electrocoagulation with Advanced Oxidation Processes. *Chemical Engineering Journal*, 356:771-80. doi: 10.1016/j.cej.2018.09.068.
- [7] Bener, S., Özlem, B., Gülen, T., Süheyda, A., y Gülin, E. (2019). Electrocoagulation Process for the Treatment of Real Textile Wastewater: Effect of Operative Conditions on the Organic Carbon Removal and Kinetic Study. *Process Safety and Environmental Protection*. 129:47-54. doi: 10.1016/j.psep.2019.06.010.
- [8] Holt, P., Barton, G. y Mitchell, C. (2005). The Future for Electrocoagulation as a Localised Water Treatment Technology. *Chemosphere*, 59(3):355-67. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.10.023.
- [9] Dura, A. y Carmel, B. (2019). The Removal of Phosphates Using Electrocoagulation with Al-Mg Anodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 846:113161. doi: 10.1016/j.jelechem.2019.05.043.
- [10] Kumar, A., Nidheesh, P. y Kumar, M. (2018). Composite Wastewater Treatment by Aerated Electrocoagulation and Modified Peroxi-Coagulation Processes. *Chemosphere*, 205:587-593. doi: 10.1016/j.chemosphere.2018.04.141.
- [11] Elnenay, A., Eldin, M., Nassef, E., Farou, G., y Abdel, M. (2017). Treatment of Drilling Fluids Wastewater by Electrocoagulation. *Egyptian Journal of Petroleum* 26(1):203-8. doi: 10.1016/j.ejpe.2016.03.005.
- [12] Nawarkar, C., y Salkar, V. (2019). Solar powered Electrocoagulation system for municipal wastewater treatment. *Fuel*, 237:222-26. doi: 10.1016/j.fuel.2018.09.140.
- [13] Aguilar, E. (2015). Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala

- laboratorio para el tratamiento de agua. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería geológica, minera, metalurgia y geográfica*. 18(35): 69-75. doi: <https://doi.org/10.15381/iigeo.v18i35.11843>
- [14] Deveci, U., Ceyhun, A., Çağdaş, G., y Yasin, O. (2019). Enhancing Treatability of Tannery Wastewater by Integrated Process of Electrocoagulation and Fungal via Using RSM in an Economic Perspective. *Process Biochemistry* 84:124-33. doi: 10.1016/j.procbio.2019.06.016.
- [15] Hashim, S., Shaw, A., Khaddar, R., Pedrola, M. y Phipps, D. (2017). Energy Efficient Electrocoagulation Using a New Flow Column Reactor to Remove Nitrate from Drinking Water – Experimental, Statistical, and Economic Approach. *Journal of Environmental Management*, 196:224-33. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.03.017.
- [16] López, M., Alarcón M., Irigoyen, J., Torres, L. y Reynoso, L. (2019). Simultaneous Removal of Fluoride and Arsenic from Well Water by Electrocoagulation. *Science of The Total Environment*, 678:181-87. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.400.
- [17] Papadopoulos, K., Rafahlia, A., Economou, C., Charalampous, N., Dailianis, S., Tatoulis, T., Tekerlekopoulou, A. y Vayenas, D. (2019). Treatment of printing ink wastewater using electrocoagulation. *Journal of Environmental Management* 237:442-48.
- [18] Pérez, S., Morales, J., Félix, R. y Hernández, O. (2011). Evaluation of the electro-coagulation process for the removal of turbidity of river water, wastewater and pond water. 1(10):79-91. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S166527382011000100009yscript=sci_abstract&lng=en
- [19] Ozay, Y., Ünşar, E., Fatih, Z., Dizge, N., Altınay N., Ali, M. y Yalvac, M. (2018). Optimization of Electrocoagulation Process and Combination of Anaerobic Digestion for the Treatment of Pistachio Processing Wastewater. *Journal of Cleaner Production*, 196:42-50. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.05.242.
- [20] Emamjomeh, M., y Muttucumaru. S. (2009). Denitrification Using a Monopolar Electrocoagulation/Flotation (ECF) Process. *Journal of Environmental Management*. 91(2):516-22. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.09.020.
- [21] Lee, S. y Graham A. (2014). Review of the Factors Relevant to the Design and Operation of an Electrocoagulation System for Wastewater Treatment. *Environmental Reviews*, 22(4):421-30.
- [22] Barrera, C., Hernández, P. y Bilyeu, B. (2018). Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives. *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*. 61-76

- [23] Hernández, E. (2015). Remoción de Compuestos Fenólicos de Aguas Residuales de la Refinación del Petróleo Mediante Electrocoagulación, Fenton y Foto-Fenton.s. Universidad Autónoma de Nuevo León. Maestría en ciencias con orientación en química analítica ambiental.
- [24] International programme on chemical safety phenol. (2020) Recuperado de: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc161.htm>.
- [25] Organización Mundial de la Salud. 2003 Phenol (EHC 161, 1994). Recuperado de: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc161.htm>.
- [26] Ministerio de Ambiente. (2003). Fenol. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/virtual/018903/Links/Guia14.pdf>
- [27] Ingrassia, V. (2015). ¿Qué efectos tiene el cianuro en el cuerpo humano? - LA NACION. Recuperado de <https://www.lanacion.com.ar/sociedad/que-efectos-tiene-el-cianuro-en-el-cuerpo-humano-nid1828468/>
- [28] Fajardo, A., Rodrigues, R., Martins, R., Castro, L. y Quinta, R. (2015). Phenolic Wastewaters Treatment by Electrocoagulation Process Using Zn Anode. Chemical Engineering Journal 275:331-41. doi: 10.1016/j.cej.2015.03.116.
- [29] Bazrafshan, E., H. Biglari, y Mahvi, A. (2012). PHENOL REMOVAL BY ELECTROCOAGULATION PROCESS FROM AQUEOUS SOLUTIONS. Fresenius Environmental Bulletin. 21(2):364-71.
- [30] Hernández, F., Peral, E. y Blanco, L. (2017). Removal of Phenolic Compounds from Oil Refinery Wastewater by Electrocoagulation and Fenton/Photo-Fenton Processes. Journal of Water Process Engineering, 19:96-100. doi: 10.1016/j.jwpe.2017.07.010.
- [31] Ogando, F., Iwagaki, B., Aguiar, C., Napolitano, J., Heredia, F., y Hernanz, D. (2019). Removal of Phenolic, Turbidity and Color in Sugarcane Juice by Electrocoagulation as a Sulfur-Free Process. Food Research International, 122:643-52. doi: 10.1016/j.foodres.2019.01.039.
- [32] Zazouli, M. y Taghavi, M. (2012). Phenol Removal From Aqueous Solutions by Electrocoagulation Technology Using Iron Electrodes: Effect of Some Variables. doi: 10.13140/2.1.1837.6967
- [33] Zazouli, M., Taghavi, M. y Bazrafshan, E. (2012). Influences of Solution Chemistry on Phenol Removal From Aqueous Environments by Electrocoagulation Process Using Aluminum Electrodes | Health Scope | Full Text. doi: 10.5812/jhs.5462
- [34] Paz, O. (2013). Efectividad de un Sistema Acoplado Electrocoagulación/Floculación Biológico para Tratamiento de Fenoles Presentes en Vinazas. Recuperado de:

- <https://1library.co/document/z1ddg8ez-efectividad-acoplado-electrocoagulacion-floculacion-biologico-tratamiento-presentes-electronico.html>
- [35] Ashtoukhy, E., Taweel, Abdelwahab, O., Nassef, E. (2013). Treatment of Petrochemical Wastewater Containing Phenolic Compounds by Electrocoagulation Using a Fixed Bed Electrochemical Reactor. *Electrochem.* 8:17.
- [36] Kulkarni, J., y Kaware. P. (2013). Review on Research for Removal of Phenol from Wastewater. 3(4):5.
- [37] Vasudevan, S. (2014). An Efficient Removal of Phenol from Water by Peroxi-Electrocoagulation Processes. *Journal of Water Process Engineering*, 2:53-57. doi: 10.1016/j.jwpe.2014.05.002.
- [38] Moussa, D., Muftah, H., Nasser, M. y Al, M. (2017). A Comprehensive Review of Electrocoagulation for Water Treatment: Potentials and Challenges. *Journal of Environmental Management*, 186:24-41. doi: 10.1016/j.jenvman.2016.10.032.
- [39] Chen, G. (2004). Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. *Separation and Purification Technology*. 38(1):11-41. doi: 10.1016/j.seppur.2003.10.006.
- [40] Kobya, Mehmet, Prof. Erhan Demirbas, Mahmut Bayramoğlu, y M. Sensoy. (2011). Optimization of Electrocoagulation Process for the Treatment of Metal Cutting Wastewaters with Response Surface Methodology. *Water, Air, and Soil Pollution*, 215:399-410. doi: 10.1007/s11270-010-0486-x.
- [41] Dimoglo, A., Sevim, P., Dinç, O., Gökmen, K. y Erdoğan, H. (2019). Electrocoagulation/Electroflotation as a Combined Process for the Laundry Wastewater Purification and Reuse. *Journal of Water Process Engineering* 31:100877. doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100877.
- [42] Peña, F. (2016). ELECTROCOAGULACIÓN DE SELENIO DESDE AGUAS RESIDUALES. Recuperado de: <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/23220/3560900232327 UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [43] Lu, J., Yan L., Mengxua, Y., Xiaoyun, M., y Shengling, L. (2015). Removing Heavy Metal Ions with Continuous Aluminum Electrocoagulation: A Study on Back Mixing and Utilization Rate of Electro-Generated Al Ions. *Chemical Engineering Journal*, 267: 86-92. doi: 10.1016/j.cej.2015.01.011.
- [44] Lakshmi, J., Sozhan, G. y Vasudevan, S. (2013). Recovery of Hydrogen and Removal of Nitrate from Water by Electrocoagulation Process. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4):2184-92. doi: 10.1007/s11356-012-1028-4.

- [45] Devlin, R., Kowalski, M. Pagaduan, E., Zhang, X., Wei, V. y Jan A. Oleszkiewicz. (2019). Electrocoagulation of Wastewater Using Aluminum, Iron, and Magnesium Electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 368: 862-68. doi: 10.1016/j.jhazmat.2018.10.017.
- [46] Pearse, M. (2003). Historical Use and Future Development of Chemicals for Solid-Liquid Separation in the Mineral Processing Industry. *Minerals Engineering*, 16(2):103-8. doi: 10.1016/S0892-6875(02)00288-1.
- [47] Malakootian, M., Yousefi, N. y Fatehizadeh. A. (2011). Survey Efficiency of Electrocoagulation on Nitrate Removal from Aqueous Solution. *International Journal of Environmental Science y Technology*, 8(1):107-14. doi: 10.1007/BF03326200.
- [48] Tabash, T. (2013). Nitrate removal from groundwater using continuous flow electrocoagulation reactor. (Tesis de maestría). Master of Science in Infrastructure Management-Civil Engineering.
- [49] Yavuz, Y. y Ögütveren, U. (2018). Treatment of Industrial Estate Wastewater by the Application of Electrocoagulation Process Using Iron Electrodes. *Journal of Environmental Management*, 207:151-58. doi: 10.1016/j.jenvman.2017.11.034.
- [50] Zerbato, M. (2013). Coagulación optimizada en el tratamiento de potabilización de agua: su efecto sobre la remoción de enteroparásitos Campoy, T.J. y Pantoja, A. (2005). Hacia una expresión de diferentes culturas en el aula: percepciones sobre la educación multicultural. *Revista de Educación*, 336, 415 – 136.