

EMPLEO DE LA ELECTROCOAGULACIÓN COMO MÉTODO PARA REMOCIÓN DE CROMO EN AGUAS RESIDUALES DE ORIGEN GALVÁNICO

USE OF THE ELECTROCOAGULATION, A METHOD FOR REMOVAL OF CHROMIUM IN WASTEWATERS OF ORIGIN GALVANIC

Nelly Bibiana, Morales Posada¹ • Gema Eunice Acosta Niño²

RESUMEN

Este artículo describe la primera fase de un proyecto que explora el método de la electrocoagulación en su aplicación como tratamiento de aguas residuales de origen galvánico. Para llevar a cabo esta fase se modificó e implementó un prototipo que tratase el efluente del proceso galvanotécnico, específicamente de la empresa Compañía Eléctrica Ltda. Se realizaron diferentes ensayos, donde se manipularon factores controlables como densidad de corriente, voltaje y distancia entre electrodos, éstos se evaluaron a partir del comportamiento de las variables pH, temperatura y conductividad; así como también evaluando el afluente y efluente del prototipo, cuantificando el Cromo (Cr) total presente y su ión más abundante (Cr^{+6}). A pesar de mantener durante el procedimiento un valor promedio de 1.94 en pH, menor al adecuado para electrocoagulación, la temperatura promedio de 39 °C y la conductividad promedio de 0.4 mS/m, los ensayos realizados nos permitieron obtener una disminución promedio del 64.7 % y 73.3 %, respectivamente, para cada especie química identificada.

Palabras clave: Electrocoagulación, metales pesados, cromo, aguas residuales galvánicas.

1 Licenciada en Química. Grupo de Tecnologías Ambientales y Química Teórica, Laboratorio de Calidad de Aguas, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. Autor para correspondencia: nelly.morales@unimilitar.edu.co

2 Química, Docente investigador y Directora del Departamento de Química, Facultad de Ciencias Básicas, Universidad Militar Nueva Granada.

ABSTRACT

This article describes the first phase of a project, which explores the electrocoagulation method and its application as a treatment of wastewater of galvanic origin. To carry out this phase a prototype was modified and implemented to treat effluent of the galvanotecnic process, specifically of the Compañía Eléctrica Ltda.

Different tests, which controllable factors such as voltage and distance between electrodes were conducted. They were evaluated from the behavior of the varying pH, temperature and conductivity. The tributary and effluent of the prototype were evaluated as well quantifying the chromium (Cr) total present and their most abundant ion (Cr^{+6}). Despite maintaining a value during the procedure on average of 1.94 in pH, less than suitable for electrocoagulation, the average temperature corresponding to 39 °C and the average conductivity of 0.4 mS/m, the studied samples, had yield an average decrease of 64.7% and 73.3%, respectively, for each chemical species identified.

Key words: Electrocoagulation, heavy metals, chrome, wastewaters galvanics.

INTRODUCCIÓN

La demanda del recurso hídrico ha ido aumentando, a pesar de que solo el 1% del agua es potable la sociedad de consumo actual requiere de ella para realizar diferentes procesos vitales, sociales y económicos (Sarría *et al*, 2005). El inconveniente a esta demanda radica en su relación con el carácter irrenovable de este recurso. Debido a esta problemática se inició la propuesta de diferentes alternativas y legislaciones dirigidas a un mejor uso del agua, su restricción y recuperación. Esto conllevó a la producción de tecnologías que contrarrestaran la cantidad de sustancias contaminantes en los afluentes y efluentes, además de reciclar estos últimos para disminuir la cantidad de agua potable requerida en los procesos de diferentes sectores sociales (agro, industrial, doméstico, etc). Con este fin, han venido desarrollándose métodos convencionales biológicos, físicos, químicos, ó una combinación de ellos, los cuales están limitados por bajos rangos de concentración y en algunos casos tener altos costos (Mollah *et al*, 2001;

Rajeshwar e Ibanez, 1997). Los tratamientos para reuso y recirculación deben ser adecuados para el propósito, tener una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente traer ventajas ambientales, debido a esto, es importante desarrollar técnicas innovadoras que entren a competir técnica, económica y ambientalmente con las tecnologías tradicionales. Dentro de las tecnologías tradicionales se encuentran procesos biológicos y procesos fisicoquímicos. Los procesos físico-químicos más comunes son: filtración, intercambio iónico, precipitación química, oxidación química, adsorción, ultrafiltración, ósmosis inversa y electrodiálisis, entre otros. Hoy en día existen una serie de tecnologías emergentes que están basadas en la electroquímica y que actualmente se presentan como alternativas competitivas frente a las tecnologías tradicionales. Se puede mencionar en este grupo la electrocoagulación, la electroflotación y la electrodecañación; estos métodos son viables porque su sistema emplea electrones para realizar el

tratamiento mientras que otros usan reactivos químicos y microorganismos, lo que los hace más costosos y en ocasiones más demorados. Entre las ventajas de los métodos electroquímicos se encuentran los beneficios ambientales, de compatibilidad, versatilidad, eficiencia de energía, seguridad, selectividad, facilidad de automatización del proceso y bajos costos (Mollah *et al*, 2001; Rajeshwar e Ibanez, 1997; Aristizábal y Bermúdez, 2007; Restrepo *et al*, 2006).

Teniendo en cuenta lo expuesto por diferentes autores, (Restrepo *et al*, 2006; Rajeshwar e Ibanez, 1997; Mollah *et al*, 2001; Mollah *et al*, 2004; Morante, 2002; Holt *et al*, 2005; Aristizábal y Bermúdez, 2007) la electrocoagulación es una técnica apropiada como alternativa a la problemática del agua, ya que disminuye la cantidad de algunas sustancias altamente contaminantes en fuentes hídricas como metales pesados (Cr, Cr⁺⁶, Zn), grasas, aceites, colorantes, sólidos suspendidos, compuestos orgánicos, etc. además de permitir que esta agua tratada pueda ser reutilizada en procesos industriales (Valcárcel, 1999; Arango, 2005; Barton *et al*, 2005).

Con este marco de ideas el presente documento muestra los resultados parciales de un estudio desarrollado por el grupo de investigación (Tecnologías Ambientales y Química Teórica), dirigido a mejorar un sistema existente de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales generadas en los procesos de recubrimientos galvánicos para proponer el uso de tecnologías limpias. Previo a este estudio se diseñó un prototipo inicial para efectuar la electrocoagulación de este tipo de aguas.

La motivación principal para el desarrollo de este estudio fue dar continuidad al estudio previo sobre la remoción de sustancias contaminantes de los procesos en la galvanotecnia, pues es una actividad industrial que genera hasta un 90% de sustancias descartadas a través de las aguas residuales, quedando solo el 10% de éstas depositadas tras el recubrimiento de los diferentes productos terminados (herramientas, puntillas, muebles, estructuras metálicas, tornillos, autopartes,

etc.). Específicamente, el cromo como ion hexavalente presenta un impacto altamente negativo sobre el ambiente, específicamente en fuentes hídricas. Los efectos producidos abarcan desde el deterioro de los sistemas de recolección de aguas servidas, el deterioro de sistemas de tratamientos microbiológicos, inhibiendo el desarrollo microbiano, hasta el efecto en la salud de los trabajadores expuestos y la población en general (República de Colombia *et al*, 2001). La empresa escogida por facilidad de ingreso y manipulación en la recolección de las aguas fue Compañía Eléctrica Ltda, quien cuenta con los certificados ISO 9001:2000 e ISO 9001:2008.

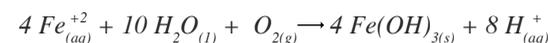
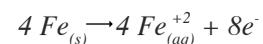
ELECTROCOAGULACIÓN

Es conveniente resaltar que la electrocoagulación es ante todo un proceso electroquímico, por lo que según lo referenciado en Mollah *et al*, 2004; las reacciones fisicoquímicas que tienen lugar en una celda de electrocoagulación son:

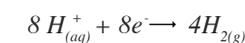
- Reducción catódica de las impurezas presentes en el agua residual.
- Descarga y coagulación de las partículas coloidales.
- Migración electroforética de iones en solución.
- Electroflotación de las partículas coaguladas ocasionada por las burbujas de hidrógeno y oxígeno producidas por los electrodos.
- Reducción de los iones metálicos en el cátodo.
- Otros procesos químicos y electroquímicos.

Cuando el hierro actúa como ánodo, como es el caso de este estudio, existen dos mecanismos propuestos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes, sea hidróxido férrico ó hidróxido ferroso (Mollah *et al*, 2001; Mollah *et al*, 2004; Restrepo *et al*, 2006; Gendel y Lahav, 2010).

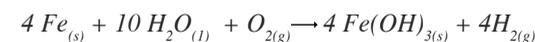
Para el primer mecanismo, en el ánodo:



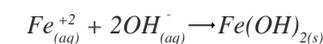
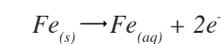
En el cátodo:



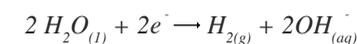
Reacción global:



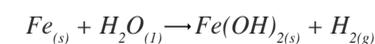
En el segundo mecanismo, en el ánodo:



En el cátodo:



Reacción global:



Al disolverse el ánodo se producen de manera continua los hidróxidos de hierro, estos permiten la aglomeración de los coloides, especialmente los de carga negativa, que posteriormente interactúan con partículas contaminantes, para finalmente ser removidos por formación de complejos o atracciones electrostáticas (Aristizábal y Bermúdez, 2007; Restrepo *et al*, 2006)

También se da la electrolisis del agua en una reacción paralela produciendo pequeñas burbujas de oxígeno en el ánodo y de hidrógeno en el cátodo. Estas burbujas atraen las partículas floculadas y las hace flotar hasta la superficie, y es por esto que el proceso de electrocoagulación está asociado de manera intrínseca a la electroflotación. Los contaminantes presentes en el agua residual son

tratados por reacción química y por precipitación o adición física o química a materiales coloidales que se generan por la erosión del electrodo. Estos son removidos posteriormente por electroflotación o por sedimentación y filtración. (Mollah *et al*, 2001; Mollah *et al*, 2004; Aristizábal y Bermúdez, 2007)

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño del prototipo y los ensayos de remoción se realizaron en el Laboratorio de Calidad de Aguas, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, ubicada en la Ciudad de Bogotá D.C., a una altura de 2630 msnm y a una temperatura promedio de 14°C. Por otra parte, el muestreo se realizó en Compañía Eléctrica Ltda., ubicada en el barrio Fontibón-Parque Industrial Los Urapanes, Ciudad de Bogotá D.C.

Finalmente, la determinación de los parámetros Cr y Cr⁺⁶ se efectuó en las instalaciones de Analquim Ltda. Análisis químicos y tratamiento de aguas, ubicado en el Barrio Sucre, Ciudad de Bogotá D.C.

Diseño del prototipo

El prototipo fue construido en acrílico, con capacidad para 8L de aguas residuales galvánicas en una única zona de operación, la cual contenía un conjunto de tres placas metálicas, dispuestas en forma vertical, dos de hierro y una de cobre, de dimensiones 10 cm x 17.6 cm y espesor de 5mm, aproximadamente, con una área superficial de 176cm. Se conectó a una fuente de voltaje (de 50 a 60dc), con corriente directa (de 3A). La distancia entre electrodos fue de 3 cm y la polaridad de las placas se ajustó al colocarlas en contacto con los cables positivo (+) ó negativo (-), quedando la placa de cobre con polaridad negativa (cátodo) y las dos de hierro, con positiva (ánodos), cumpliendo la función de electrodos en paralelo dentro de la celda electrolítica. Se muestra el sistema para electrocoagulación con electrodos en paralelo, (Fig. 1).

Para realizar el diseño del prototipo se debe tener en cuenta el tipo de reactor a implementar, para ello según (Restrepo *et al*, 2006; Rigola, 1990) los reactores para electrocoagulación pueden clasificarse en primera instancia como tipo Batch o reactores de sistema continuo. La selección de uno de estos tipos de reactor depende de las características del contaminante y de su concentración, así como de las cantidades de agua residual a tratar (Chen, 2004). También se pueden clasificar por la forma de separar el contaminante después del proceso, ya sea por flotación o sedimentación. Según los intereses del proyecto se definió realizar un reactor tipo batch con el proceso de electrocoagulación – flotación, según lo expuesto en líneas anteriores, para aprovechar la producción de burbujas (O₂ e H₂) en la separación del contaminante.

El diseño formado por un par de electrodos, no es el más adecuado a la hora del proceso ya que para obtener una rata adecuada de disolución del metal se requiere de electrodos con una gran área superficial, es por esta razón que se utilizan celdas con electrodos en paralelo.

Caracterización de las aguas residuales

Con el fin de evaluar el sistema, se realizó una visita a las instalaciones de la empresa Compañía Eléctrica Ltda., donde se recolectaron 4 muestras (32L) de las aguas dispuestas a ser descartadas en el sistema de alcantarillado. Con éstas, se ejecutaron los diferentes ensayos en el prototipo descrito; así como las mediciones, donde el pH fue medido con un pH-metro Schott Duran CG842 (Exactitud ± 0.005 +15°C...+35°C); la temperatura con el mismo equipo ph-metro Schott Duran CG842 (NTC30 ±0.1 PT 1000, exactitud ±0.5 a 0°C...15°C, ±0.1 a 15°C...35°C, ±1 a 35°C...55°C); y la conductividad con un conductímetro Extech Ref. 320, (Exactitud ±0.3rdg+1dgt entre -20 a 60°C), todos los mencionados con una calibración previa a la toma de datos. Se siguieron las metodologías descritas en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater para la determinación de Cr por absorción atómica de llama y para el parámetro de Cr⁺⁶ por método colorimétrico (Difenilcarbazida), SM 3111-CrB y SM 3500-CrB, respectivamente (American Public Health Association *et al*, 2005). Estos métodos son ampliamente

conocidos y desarrollados para la cuantificación de estas especies químicas (Aristizabal y Bermúdez, 2007; Heidmann y Calmano, 2008) así como el método de plasma de acoplamiento inductivo (Ping *et al*, 2005) para Cr.

Con el fin de comprobar la eficiencia del prototipo empleado en el proceso de remoción de cromo, se realizó un tratamiento estadístico sobre los porcentajes de remoción de cromo y cromo hexavalente generados por el proceso (EC); fue ejecutado teniendo en cuenta las dos especies químicas y las muestras, con el siguiente modelo:

$$\text{porcentaje de remoción} = \text{Tipo de cromo}_i + \text{Muestra}_j + \epsilon_{i,j}$$

VARIABLE	ENSAYO			
	1	2	3	4
pH	1.52	2.07	1.44	2.73
Conductividad (mS/m)	0.2	0.4	0.6	0.4
Temperatura (°C)	37.5	39.0	38.5	39.0

Tabla 1. Valores de pH, conductividad y temperatura durante el tratamiento de remoción.

Previo a este modelo, se inició el análisis con dos hipótesis:

$$H_0: \text{media de Cr} = \text{media de Cr}^{+6}$$

$$H_1: \text{media de Cr} \neq \text{media de Cr}^{+6}$$

De las cuales, según un nivel de significancia α=0.05 se rechazó la hipótesis de las medias entre las especies químicas (Cr y Cr⁺⁶) que sean iguales, y se propuso el modelo presentado anteriormente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de pH estuvieron en un promedio de 1.94, para la conductividad de 0.4 mS/m y la temperatura de 38.5 °C. El proceso duró 30 minutos para cada ensayo y a los 15 minutos del proceso se registraron las mediciones de las variables. La tabla a continuación, (Tabla 1), corresponde a los valores de operación dados durante el tratamiento a 8L de las aguas residuales muestreadas:

Así mismo, se controlaron factores como densidad de corriente y distancia entre electrodos manteniendo constante el amperaje y el voltaje. Se muestra el comportamiento de remoción de Cr y Cr⁺⁶ en el prototipo de electrocoagulación, según las Tablas 2 y 3, Figuras 2, 3.

Diseño del sistema inicial

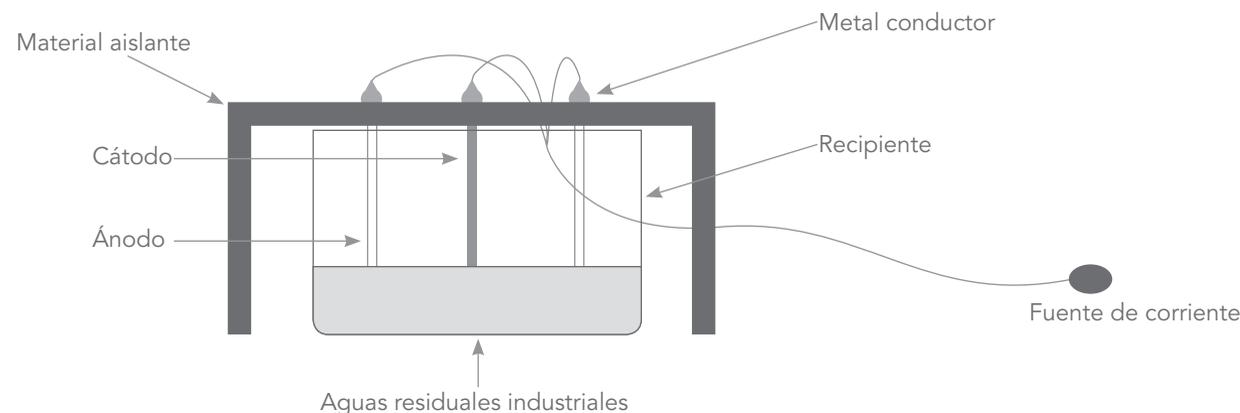


Figura 1. Prototipo de celda de electrocoagulación.

Tabla de análisis de varianza

Respuesta	Porcentaje de remoción				
	GL	Suma cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	P-valor
Tipo de cromo	2	56693	28346.5	3.643.430	3.01e-07
Muestra	4	1537	384.4	49.404	0.001165
Finales	4	31	7.8		

CROMO ^{*1*2}	Concentración ppm	Porcentaje %
Inicial	0,850	100,0
Final M1	0,310	63,5
Final M2	0,299	64,8
Final M3	0,302	64,5
Final M4	0,289	66,0
Final Promedio	0,300	64,7

Tabla 2. Comportamiento del cromo, antes y después del proceso (EC) *1 Límite de detección: 0.06mg/L; *2 Incertidumbre: 0.03mg/L; Muestra (M).

CROMO (VI) ^{*3*4}	Concentración ppm	Porcentaje %
Inicial	0,600	100,0
Final M1	0,160	73,3
Final M2	0,161	73,2
Final M3	0,160	73,3
Final M4	0,159	73,5
Final Promedio	0,160	73,3

Tabla 3. Comportamiento del cromo (VI), antes y después del proceso (EC) *3 Límite de detección: 0.02mg/L; *4 Incertidumbre: 0.005mg/L; Muestra (M)

El análisis de varianza del modelo es el siguiente:

Al fijar un $\alpha = 5\%$, se determina que el tipo de cromo y las muestras, por lo menos una de sus medias es distinta, es decir tiene un efecto sobre el porcentaje de remoción.

Para identificar el efecto individual de cada clase de cromo y de las muestras se tiene en cuenta los coeficientes de modelo:

Al comparar con un $\alpha = 5\%$, los coeficientes son significativos en el análisis donde se muestra que el efecto del Cr es 96.549 sobre el porcentaje de remoción,

mientras que el del Cr⁺⁶ es del 103.451, indica que éste último muestra un efecto mayor que Cr sobre el porcentaje de remoción. Por otro lado las muestras tienen efecto negativo, es decir cada una está disminuyendo con respecto al estado inicial y se determina que son similares estas disminuciones. En M1 se presenta mayor efecto de disminución, 31.585 y el menor está en M4.

Coefficientes

	Estimación	Error estándar	Valor T	P-valor
Tipo de cromo (Cr)	96.549	2.161	44.69	1.50e-06
Tipo de cromo (Cr ⁺⁶)	103.451	2.161	47.88	1.14e-06
Muestra 1 (M1)	-31.585	2.789	-11.32	0.000347
Muestra 2 (M2)	-30.988	2.789	-11.11	0.000373
Muestra 3 (M3)	-31.098	2.789	-11.15	0.000368
Muestra 4 (M4)	-30.250	2.789	-10.85	0.000410



Figura 2. Porcentaje de remoción de cromo, antes y después del proceso (EC).

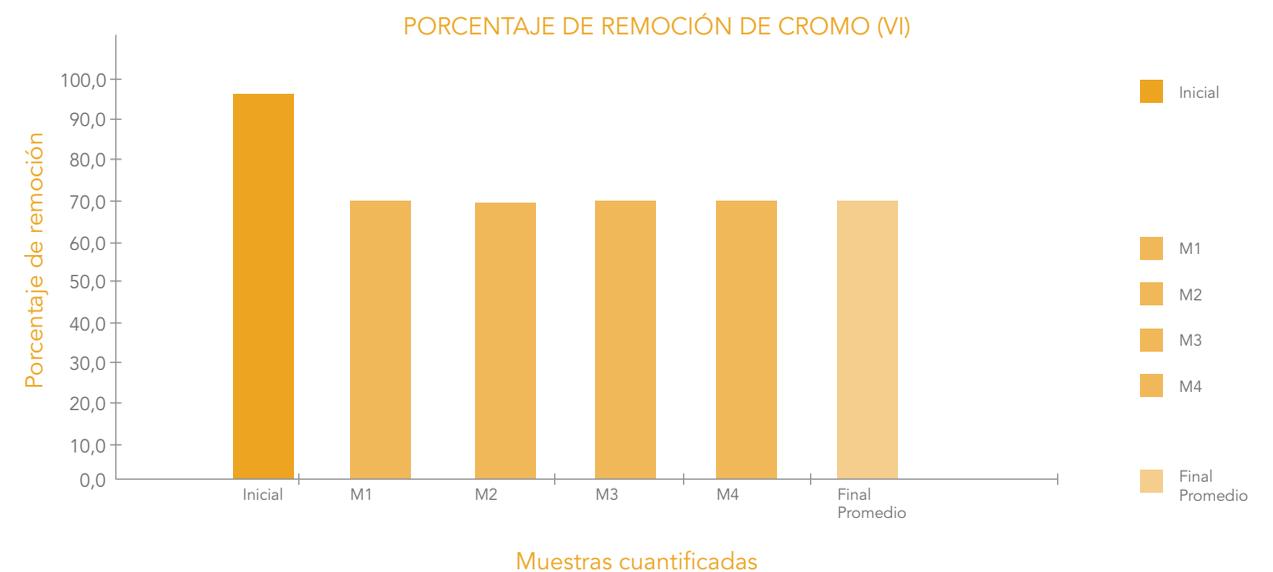


Figura 3. Porcentaje de remoción de cromo (VI), antes y después del proceso (EC).

Los resultados del análisis estadístico, nos ayudan a dilucidar qué: el prototipo es eficiente en cuanto a la cantidad de cromo removido, y que se comporta diferente dependiendo de la clase de cromo que se encuentre en la muestra. Así mismo, que efectivamente existe una disminución en el contenido de cromo del agua tratada con respecto a las aguas sin tratar, indicando que el sistema empleado, con los parámetros utilizados produce el efecto esperado en cuanto a la reducción del cromo como contaminante en aguas residuales.

La electrocoagulación combinada con electroflotación ha sido probada como alternativa para la remoción del cromo en el agua residual (Jiang *et al.* 2002; Ge *et al.*, 2004; Ping *et al.*, 2005; Restrepo *et al.*, 2006) de aguas procedentes de electroplateado. De un valor inicial 0.85 mg/L se llegó a un promedio final luego del tratamiento, de 0.30 mg/L de Cr, obteniendo así una remoción del 64.7 %; en el caso de Cr⁺⁶ el valor inicial en las aguas residuales fue de 0.60mg/L que luego del tratamiento se redujo a un promedio final de 0.16 mg/L, mostrando un 73.3 % de remoción.

El haber producido una eficiencia de remoción en los porcentajes reportados, determinó que la disminución de su carga contaminante en las fuentes hídricas próximas es posible, a pesar de que las aguas residuales de Compañía Eléctrica Ltda. mostraron un valor permitido de Cr antes del tratamiento (menor a 1.0mg/L), el valor de Cr⁺⁶ inicial promedio supera al establecido 0.5 mg/L (Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, 1997), por ello es conveniente mencionar que este tratamiento promueve el erradicar o disminuir considerablemente los valores de Cr y Cr⁺⁶. Se determinó que el sistema de tratamiento para aguas residuales de origen galvánico obtuvo valores óptimos, teniendo en cuenta la medición de variables como pH, conductividad y temperatura que a pesar de no encontrarse dentro de lo establecido según lo reportado por la literatura, puede evidenciar la capacidad de la electrocoagulación como removedor de metales pesados en fuentes hídricas. Así mismo, la eficiencia del proceso determinó que el sistema de tratamiento para aguas residuales galvánicas se puede implementar para obtener un efluente más apropiado con fines de reuso.

Después del tratamiento, el valor reportado de cromo total está por debajo del estándar colombiano permitido en un 70% y para Cr⁺⁶ en un 68%, sabiendo que éste último es un contaminante en mayor número en aguas residuales, se determina que el tratamiento de electrocoagulación combinado con electroflotación puede ser un método eficaz para remover esta clase de contaminantes.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Militar Nueva Granada por la financiación total del proyecto, por medio del programa de Proyectos de Iniciación Científica.

BIBLIOGRAFIA

- American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21ª Edition. American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation.
- Arango Á. 2005. La electrocoagulación una nueva alternativa para el tratamiento de aguas residuales. Trabajo de grado. Especialización en Ingeniería Ambiental. Escuela de Ingenierías. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín.
- Aristizábal, A; Bermúdez, M. 2007. Estudio de la factibilidad de un sistema de electrocoagulación para tratamiento de aguas procedentes de lavanderías industriales con fines de reuso. Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería Química. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín. 142p.
- Barton, G.; Holt, P. y Mitchell, C. 2005. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *Chemosphere*, 59, N° 3:355-367.
- Chen G. 2004. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38, N°1:11-41.
- Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 1997. Resolución 1074 del 28 de octubre de 1997.
- Ge J, Qu J, Lei P y Liu H. 2004. New bipolar electrocoagulation–electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*, 36, N° 1: 33–39.
- Gendel Y, Lahav O. 2010. A new approach to increasing the efficiency of low-pH Fe-electrocoagulation applications. *Journal of Hazardous Materials*, 183:596-601.
- Heidmann I, Calmano W. 2008. Removal of Cr(VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes. *Separation and Purification Technology*, 6: 15-21.
- Holt P, Barton G y Mitchell C. 2005. The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology. *Chemosphere*, 59, N°3:355–367.
- Jiang J, Graham N, André C, Kelsall G y Brandon N. 2002. Laboratory study of electro-coagulation–flotation for water treatment. *Water Research*, 36, N°16:4064-4078.
- Mollah M, Schennach R, Parga J y Cocke D. 2001. Electrocoagulation (EC)-Science and applications. *Journal of Hazardous Materials*. 84, N°1:29-41.
- Mollah M, Morkovsky P, Gomes J, Kesmez M, Parga J y Cocke D. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114, N° 1-3:199-210.
- Morante G. 2002. Electrocoagulación de aguas residuales. *Revista Colombiana de Física*, 34, N°2:484-487.
- Ping G, Chen X, Sheng F y Chen G. 2005. Removal of chromium(VI) from wastewater by combined electrocoagulation – electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology*, 43, N° 2:117-123.
- Rajeshwar K e Ibanez J. 1997. Environmental electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement. Academic Press, Inc. San Diego, California.
- Redacción Negocios. 2008. Colombia solo trata 9% de sus aguas residuales. www.elspectador.com/impreso/negocios/articuloimpreso-colombia-solo-trata-9-de-sus-aguas-residuales. 25. Sep.08.
- República de Colombia, Ministerio de Agricultura. 1984. Decreto 1594 del 26 de Junio de 1984. "Usos del agua y residuos líquidos".
- República de Colombia, Ministerio del Medio Ambiente, FUNDES. 2001. Guía de Buenas Prácticas para el Sector Galvanotécnica. FUNDES, Bogotá, 87p.
- Restrepo A, Arango A y Garcés L. 2006. La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas. *Producción + Limpia*, 1, N°2:58-77.
- Rigola M. 1990. Tratamiento de aguas industriales: Aguas de proceso y residuales. MARCOMBO S.A., Barcelona, 155p.
- Sarria V, Parra S, Rincón A, Torres R y Pulgarín C. 2005. Nuevos sistemas electroquímicos y fotoquímicos para el tratamiento de aguas residuales y de bebida. *Revista Colombiana de Química*, 34, N°2:161-173.
- Valcárcel, J. 1999. Oxidación electroquímica de metanol y fenol sobre electrodos de dióxido de plomo puro y dopado: Aplicación al tratamiento electroquímico de aguas residuales. Tesis. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. Alicante. 271p.