

REMOCIÓN DE NÍQUEL Y DQO PRESENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ MEDIANTE ELECTROCOAGULACIÓN

IVÁN DARÍO MERCADO MARTÍNEZ*

GERMÁN GONZÁLEZ SILVA**

SERGIO HUMBERTO VALENCIA HURTADO***

RESUMEN

Mediante este estudio se determinó si la técnica de electrocoagulación contribuye a minimizar la concentración de níquel y materia orgánica y la demanda química de oxígeno (DQO) en las aguas residuales de la industria automotriz. Se empleó un diseño experimental factorial multinivel aleatorio en el que la densidad de la corriente y el tiempo de reacción fueron evaluados en tres niveles, mientras que la separación entre electrodos fue analizada en dos niveles. La electrocoagulación se llevó a cabo en un reactor *batch* usando electrodos de hierro con arreglo monopolar. Fueron utilizadas las técnicas analíticas de digestión ácida, absorción atómica de llama de aire-acetileno y reflujos cerrado-colorimétrico (micro DQO) para determinar el contenido de los contaminantes. Las condiciones con que se obtuvo la mayor descontaminación del agua analizada fue con la densidad de corriente aplicada: 1,04 A/dm² y tiempo de operación: 17 minutos; con estas variables se observó que la separación electródica no influyó. Los resultados indican que la electrocoagulación podría ser usada para disminuir el níquel y la materia orgánica (DQO) presentes en las aguas residuales de la industria automotriz.

PALABRAS CLAVES: demanda química de oxígeno (DQO); níquel; electrocoagulación; agua residual; industria automotriz; descontaminación.

* Ingeniero químico, Magíster en Ingeniería Ambiental. Consultor ambiental. Correo electrónico: ivandario.mercado@gmail.com

** Ingeniero químico, doctor en Ingeniería Química. Docente programa de Ingeniería Química, Universidad de San Buenaventura seccional Cartagena, Colombia. Miembro del Grupo de Investigaciones de las Ciencias de las Ingenierías –GICI–. Correo electrónico: germangsilva@gmail.com

*** Ingeniero químico, especialista en Ingeniería Ambiental, doctor en Ingeniería. Miembro del Grupo de Investigaciones Procesos Físicoquímicos Aplicados, Universidad de Antioquia. Correo electrónico: hvalens@gmail.com

REMOVAL OF NICKEL AND COD PRESENT IN WASTEWATERS FROM AUTOMOTIVE INDUSTRY BY ELECTROCOAGULATION

ABSTRACT

By means of this study was determined if the electrocoagulation technique helps to minimize the nickel and organic matter, chemical oxygen demand (COD) concentration, present in wastewaters from automotive industry. A randomized multilevel factorial experimental design was used; being the current density and reaction time evaluated in three levels, while the separation between electrodes was analyzed at two levels. Electrocoagulation was carried out in a batch reactor using iron electrodes with monopolar arrangement. The acid digestion, atomic absorption air-acetylene flame and the closed reflux-colorimetric (micro COD) analytical techniques were used to determine the content of the contaminants. The conditions where it got the most decontamination of the water analyzed were found; being the Applied current density: 1,04 A/dm², operative time: 17 minutes y; did not the electrode separation influence. The results show that electrocoagulation could be effective to reduce nickel and organic matter (COD) present in wastewaters from automotive industry.

KEYWORDS: chemical oxygen demand (COD); nickel; electrocoagulation; wastewater; automotive industry; decontamination.

REMOÇÃO DE NÍQUEL E DQO PRESENTES NAS ÁGUAS RESIDUAIS DA INDÚSTRIA AUTOMOTRIZ MEDIANTE ELETROCOAGULAÇÃO

RESUMO

Mediante este estudo determinou-se se a técnica de electrocoagulación contribui a minimizar a concentração de níquel e matéria orgânica e a demanda química de oxigénio (DQO) nas águas residuales da indústria automotriz. Empregou-se um desenho experimental factorial multinivel aleatório no que a densidade da corrente e o tempo de reacção foram avaliados em três níveis, enquanto a separação entre eléctrodos foi analisada em dois níveis. A electrocoagulación levou-se a cabo num reactor batch usando eléctrodos de ferro com arranjo monopolar. Foram utilizadas as técnicas analíticas de digestión ácida, absorção atómica de lume de ar-acetileno e reflujo fechado-colorimétrico (micro DQO) para determinar o conteúdo dos contaminantes. As condições com que se obteve a maior descontaminação da água analisada foi com a densidade de corrente aplicada: 1,04 A/dm² e tempo de operação: 17 minutos; com estas variáveis observou-se que a separação electródica não influiu. Os resultados indicam que a electrocoagulación poderia ser usada para diminuir o níquel e a matéria orgânica (DQO) presentes nas águas residuales da indústria automotriz.

PALAVRAS-CÓDIGO: demanda química de oxigénio; níquel; eletrocoagulação; água residual; indústria automotriz; descontaminação.

1. INTRODUCCIÓN

Las descargas de efluentes de una variedad de actividades de origen antropogénico han tenido como resultado la contaminación de los ríos, lagos y otros cuerpos de agua. El acelerado crecimiento poblacional y la expansión de las zonas urbanas han incrementado los impactos adversos sobre los recursos hídricos (Escobar, Soto-Salazar y Toral, 2006). Las aguas residuales

industriales siguen siendo a nivel mundial un problema importante de contaminación ambiental, debido a su enorme cantidad y diversidad (Zodi *et al.*, 2010). El sector automotor no es la excepción. En sus aguas residuales se encuentran sustancias contaminantes tales como metales pesados, sólidos suspendidos, grasas y aceites, materia orgánica, entre otras (Mercado, Arango y Ríos, 2010). En general, los metales pesados pueden causar en el ser humano un problema de salud



a largo plazo (Khelifa, Moulay y Naceur, 2005) porque son bioacumulables, tóxicos y cancerígenos, incluso a bajas concentraciones (Vasudevan, Lakshmi y Sozhan, 2011). Aunque el níquel —no es el único metal pesado presente— es el que se encuentra en mayor proporción. Una alta cantidad de níquel en los cuerpos de agua receptores producto de las aguas residuales industriales generadas en fábricas automotrices ocasiona un notable deterioro del medio ambiente reflejado en la modificación de la vida de los ecosistemas allí presentes (Mercado, Arango y Ríos, 2010).

La contaminación de los recursos hídricos ha motivado el desarrollo de soluciones innovadoras, tecnologías efectivas y de bajo costo para tratar las aguas residuales industriales (Escobar, Soto-Salazar y Toral, 2006). En los últimos años la técnica de electrocoagulación ha sido usada para tal fin (Zodi *et al.*, 2010). Este método puede ser considerado un proceso de corrosión acelerada originado por vía electroquímica (Noubactep y Schöner, 2010). Consiste en crear flóculos de hidróxido metálicos en el agua residual mediante electrodisolución de ánodos solubles, generalmente fabricados de hierro o aluminio. La generación de cationes metálicos se lleva a cabo en el ánodo debido a su oxidación electroquímica, además de oxígeno (Heidmann y Calmano, 2008a); mientras en el cátodo se produce hidrógeno (Akbal y Camci, 2011) e iones hidroxilo (Aber, Amani-Ghadim y Mirzajani, 2009). Esto se logra con el paso de corriente eléctrica a través de los electrodos (Merzouk *et al.*, 2009), considerada un “reactivo limpio”, haciendo esta tecnología compatible con el medio ambiente (Chou *et al.*, 2010).

En la electrocoagulación, la separación de los contaminantes contenidos en el agua residual se produce por dos vías: flotación y/o sedimentación (Meas *et al.*, 2010; Zaroual *et al.*, 2009). El volumen de lodo generado es mínimo porque no requiere adicionar ningún tipo de producto químico al agua que se va a depurar (Heidmann y Calmano, 2008b; Mouedhen *et al.*, 2009; Sasson, Calmano y Adin, 2009; Heidmann y Calmano, 2010; Top *et al.*, 2011; Keshmirizadeh, Yousefi y Rofouei, 2011).

Este tratamiento electroquímico ha demostrado ser muy eficiente para eliminar simultáneamente materia orgánica y metales pesados presentes en las aguas residuales industriales (Zongo *et al.*, 2009; Kabdaşlı

et al., 2009; Benhadji, Ahmed y Maachi, 2011), pero también ha sido utilizado para depurar estos contaminantes de forma independiente (Cheng, 2006; Mercado y Ordóñez, 2007; Ilhan *et al.*, 2008; Mercado, Reyes y Agrono, 2008; Şengil, Kulaç y Özacar, 2009; Mercado y Rivera, 2010; Labanowski, Pallier y Feuillade-Cathalaud, 2010; Hanay y Hasar, 2011).

El problema ambiental del recurso hídrico se agrava por la presencia de materia orgánica en los cuerpos de agua receptores y en las descargas a los mismos, porque tiene una alta capacidad de retención de los metales pesados que de esta manera son transportados aguas abajo, degradando los ecosistemas por donde circulan (Warren, 1981; Ittekkot y Laane, 1990; Bubb y Lester, 1994; Fuchs *et al.*, 1997; Dekov *et al.*, 1998). Por lo anterior surgió la necesidad de analizar la remoción simultánea de metales pesados y materia orgánica presentes en las aguas residuales de la industria automotriz al aplicar el proceso de electrocoagulación, para conocer si esta técnica electroquímica realmente contribuye a minimizar su contenido.

Los metales pesados que se pueden encontrar en las aguas residuales del sector automotor son: plomo, cromo, cadmio, zinc y níquel. Por costos, y teniendo en cuenta que el níquel se encontró en mayor proporción en estas aguas, se analizó este elemento. Para dicho estudio, la DQO (demanda química de oxígeno) es el parámetro usado para investigar el comportamiento de la materia orgánica.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó un reactor *batch* compuesto por una cuba de acrílico de 2 l de capacidad donde se introdujeron seis electrodos de hierro (tres ánodos y tres cátodos), diseñados como placas planas rectangulares con las siguientes dimensiones de ancho, largo y espesor: 10 cm x 13,5 cm x 1 mm; conectados todos en paralelo, trabajando de forma monopolar y formando cinco celdas; originando un área efectiva total de reacción de 6,75 dm², como resultado de la multiplicación del área de un solo electrodo y el número de celdas utilizadas.

Durante el tratamiento de electrocoagulación, la cantidad de coagulante dosificado en el agua residual es función de muchos factores entre los que se encuentran parámetros electroquímicos como: la densidad de

corriente aplicada, tiempo de reacción y el material utilizado para diseñar los electrodos (Heidmann y Calmano, 2008a; Heidmann y Calmano, 2008b; Zodi *et al.*, 2010). Por ello se llevó a cabo un estudio preliminar (Mercado, Arango y Toro, 2009) para obtener los mejores valores de la densidad de corriente, tiempo de operación y separación entre electrodos. Las densidades de corriente se obtuvieron dividiendo la corriente aplicada al sistema (3,6; 5,0 y 7,0 A) y el área total efectiva de reacción (6,75 dm²).

Los resultados anteriores fueron el punto de partida para desarrollar una experimentación exploratoria en el programa estadístico *Statgraphics Plus 5.1*, prueba realizada en el laboratorio donde se planteó un diseño experimental de tres factores multinivel completamente aleatorio, el cual permitió considerar simultáneamente los porcentajes de remoción de níquel y DQO como variable respuesta. La DQO representa el oxígeno necesario para oxidar tanto la materia orgánica como algunos compuestos inorgánicos (Moreno-Casillas *et al.*, 2007).

La densidad de corriente (J) y el tiempo de proceso (t) fueron evaluados en tres niveles: (0,53; 0,74 y 1,04 A/dm² y 10, 15 y 20 min, respectivamente); mientras el factor separación entre electrodos (D) fue analizado en dos niveles (1,1 y 1,5 cm). Siempre se realizaron réplicas por triplicado de los experimentos, de tal manera que pudieran analizarse estadísticamente para obtener conclusiones válidas.

En el laboratorio ambiental de la Universidad Pontificia Bolivariana, sede Medellín, se realizaron los análisis químicos que determinaron el contenido de níquel y materia orgánica presentes en las muestras de agua residual industrial del sector automotor. Los metales fueron analizados previa digestión ácida y luego medidos por absorción atómica de llama con aire-acetileno y la DQO se hizo por el método del reflujo cerrado-colorimétrico (APHA-AWWA-WEF, 2005).

Cada parámetro fisicoquímico analizado tenía un grado de influencia en la variable respuesta (50% cada uno), que se asignó teniendo en cuenta que el objetivo principal de este estudio era remover simultáneamente los dos contaminantes.

El diseño experimental factorial multinivel planteado tiene la estructura $J \times t \times D$ ó $3 \times 3 \times 2$ que permitió

investigar el efecto individual y la interacción entre los factores sobre la variable respuesta, al elaborar un análisis de varianza, ANOVA, mediante el programa estadístico *Statgraphics Plus 5.1* de la información obtenida.

El modelo estadístico utilizado para el análisis de la información fue:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

donde:

μ es el porcentaje medio de la remoción simultánea de níquel y DQO en el modelo.

α_i es el efecto del i -ésimo nivel del factor densidad de corriente; siendo $i = 0,53; 0,74$ y $1,04$ A/dm². β_j es el efecto del j -ésimo nivel del factor tiempo de operación, siendo $j = 10, 15$ y 20 min.

γ_k es el efecto del k -ésimo nivel del factor separación entre electrodos, siendo $k = 1,1$ y $1,5$ cm.

$(\alpha\beta)_{ij}$ es el efecto de interacción entre los niveles i y j de los factores densidad de corriente y tiempo de operación.

$(\alpha\gamma)_{ik}$ es el efecto de interacción entre los niveles i y k de los factores densidad de corriente y separación entre electrodos.

$(\beta\gamma)_{jk}$ es el efecto de interacción entre los niveles j y k de los factores tiempo de operación y separación entre electrodos.

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ es el efecto de interacción entre los niveles i, j y k de los factores densidad de corriente, tiempo de operación y separación entre electrodos.

γ_{ijkl} es la l -ésima observación del porcentaje de remoción simultánea de níquel y DQO observado en los niveles i, j y k de los factores densidad de corriente, tiempo de operación y separación entre electrodos.

ε_{ijkl} es el l -ésimo término de error aleatorio.

Este análisis permitió determinar con un nivel de confianza del 95% los factores y las interacciones entre estos, que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la remoción simultánea de níquel y DQO de las aguas residuales de la industria automotriz, al ser tratadas con el proceso de electrocoagulación. Además de observar su grado de influencia.



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

La tabla 1 grafica los valores de la DQO y del níquel presentes en el agua residual de la industria automotriz antes de ser tratada con el método electroquímico de electrocoagulación. Debido al número de experimentos por elaborar y a la capacidad de almacenamiento que se tenía para las muestras, fue necesario realizar cinco muestreos para recolectar el agua residual objeto de estudio, cuyas características fueron muy similares.

Teniendo en cuenta que en los cuerpos de agua receptores de las aguas residuales industriales la absorción de los metales pesados, en la materia en suspensión, se lleva a cabo en la materia orgánica (Warren, 1981; Bubb y Lester, 1994). Siendo la materia en suspensión de estas fuentes de agua en su mayor parte materia orgánica. Por tanto, una trampa de alta capacidad de retención de los metales traza en solución (Ittekkot y Laane, 1990; Dekov *et al.*, 1998). Además, reconociendo que los metales pesados como el plomo, cromo, zinc y níquel tienen una mayor afinidad por asociarse a la materia orgánica (Bubb y Lester, 1994; Fuchs *et al.*, 1997). Es importante destacar la remoción simultánea de los parámetros fisicoquímicos analizados en este estudio, níquel y DQO.

La figura 1 muestra los porcentajes de remoción de níquel y DQO obtenidos en el laboratorio al tratar las aguas residuales de la industria automotriz con el método de electrocoagulación utilizado en un sistema *batch*, bajo las condiciones del diseño experimental planteado. En general, se observa una mayor eliminación de níquel de las aguas residuales analizadas (> 60%) en comparación a la DQO contenida en ellas (< 40%). Siempre los dos parámetros analizados fueron retirados del agua en alguna proporción. Esto demuestra que la electrocoagulación es un proceso electroquímico que puede ser empleado para minimizar el contenido de níquel presente en las aguas residuales industriales que contengan materia orgánica, que a su vez, también disminuye, aunque no en la misma proporción.

También, en la figura 1 se observa que la eficiencia en la remoción de la DQO incrementa con el aumento del tiempo de operación (t) para las

Tabla 1. Condiciones iniciales de los parámetros analizados

Parámetro	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5
DQO (mg/L)	1544,7	1451,0	1578,2	1491,2	1451,0
Níquel (mg/L)	2,7863	2,9965	2,9103	2,9550	2,9340

mismas condiciones de densidad de corriente (J) y distancia entre electrodos (D). Este fenómeno no se genera al utilizar una densidad de corriente de 1,04 A/dm². Sin embargo, la eficiencia en la eliminación de níquel únicamente se incrementa con el aumento del tiempo de operación para las mismas condiciones de distancia entre electrodos al emplear una densidad de corriente de 1,04 A/dm².

Además, la figura 1 presenta las mayores cantidades de níquel y DQO eliminadas del agua objeto de estudio, las cuales se obtuvieron al utilizar una densidad de corriente (J) de 1,04 A/dm². Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este estudio era remover simultáneamente los dos contaminantes en su mayor proporción, también se evidencia que el tiempo de operación del tratamiento (t) debe ser un valor que se encuentra dentro de un rango comprendido entre 15 y 20 minutos. La eliminación de los contaminantes, en este estudio en particular, es independiente de la separación electródica empleada (1,5 o 1,1 cm).

Se realizó un análisis estadístico con el programa *Statgraphics Plus 5.1* del diseño experimental planteado, cuyos resultados se presentan en la tabla 2 mediante un análisis de varianza (tabla ANOVA). Con un nivel de confianza del 95%, los factores densidad de corriente y tiempo de operación se aceptaron como parámetros electroquímicos influyentes sobre la remoción simultánea de níquel y DQO (valor P < 0,05). Sin embargo, la separación electródica analizada en este trabajo (1,1 y 1,5 cm) y las interacciones entre los distintos factores analizados no influyeron significativamente sobre la variable respuesta. La relación F mostró el grado de influencia de los factores, para este caso,

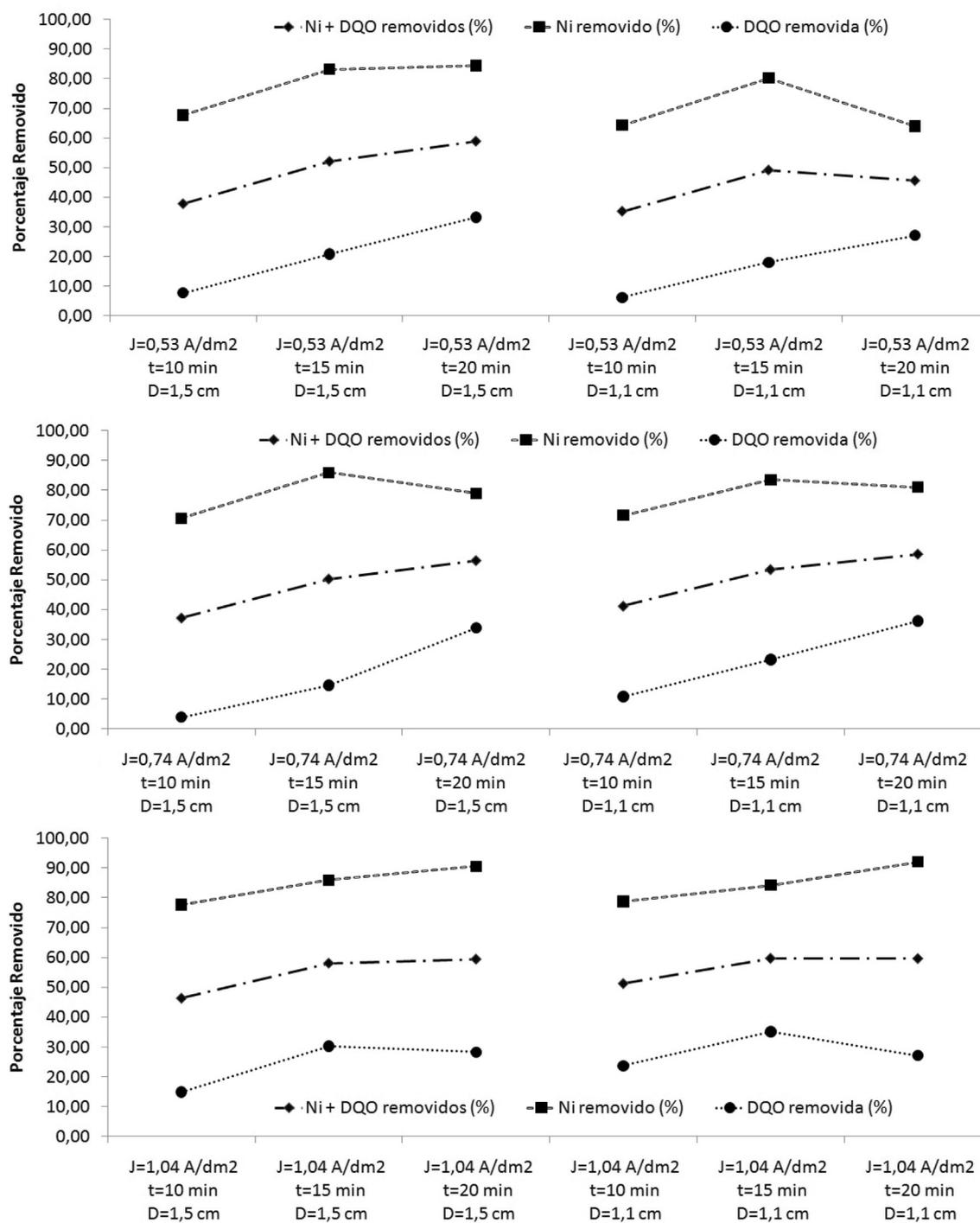


Figura 1. Porcentajes de remoción de níquel y DQO al utilizar una densidad de corriente (J) de 0,53 A/dm²; 0,74 A/dm²; 1,04 A/dm², en tiempos de operación (t) de 10, 15 y 20 minutos, manteniendo una separación eléctrica (D) de 1,5 y 1,1 centímetros

**Tabla 2.** Análisis de varianza del diseño experimental de tres factores

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	Relación F	Valor P
A: Densidad de corriente	2	807,165	403,582	7,07	0,0026
B: Tiempo de operación	2	2278,03	1139,02	19,96	0,0000
C: Separación electródica	1	1,28807	1,28807	0,02	0,8814
Interacción AB	4	103,158	25,7896	0,45	0,7703
Interacción AC	2	239,193	119,596	2,10	0,1377
Interacción BC	2	80,1901	40,0951	0,70	0,5019
Interacción ABC	4	51,9176	12,9794	0,23	0,9212
Residuos	36	2054,22	57,0615		
Total (corregido)	53	5615,16			

el tiempo de operación influyó más sobre el proceso de electrocoagulación que la densidad de corriente.

Finalmente, el análisis estadístico del diseño factorial planteado muestra una región donde se obtiene el mayor porcentaje de remoción simultánea de los contaminantes, la cual se relaciona directamente con las mejores condiciones operativas de los parámetros electroquímicos que es necesario controlar durante el proceso de electrocoagulación, siendo en este caso el tiempo de operación y la densidad de corriente; cuyos valores son 17 min y 1,04 A/dm², respectivamente. Sin embargo, no fueron encontrados los valores óptimos de esos factores. Sólo se conoce la región donde se localizan.

4. CONCLUSIONES

Mediante esta investigación se demostró que la electrocoagulación es una tecnología capaz de depurar simultáneamente metales pesados como níquel y materia orgánica (DQO) presentes en las aguas residuales de la industria automotriz, siendo el tiempo de operación (en mayor grado) y la densidad de corriente (en menor grado) los factores que influyen sobre la remoción de estos dos contaminantes.

El análisis estadístico del diseño experimental planteado dio a conocer la región donde se obtiene la mayor descontaminación del agua objeto de estudio, que se logra al aplicar una densidad de corriente de 1,04 A/dm² durante

un tiempo de operación de 17 minutos cuando se lleva cabo el proceso electroquímico. Sin embargo, no fueron encontrados los valores óptimos de esos factores.

La electrocoagulación es una técnica que debe ser utilizada en futuras investigaciones buscando evaluar el tratamiento de otros metales pesados presentes en las aguas residuales industriales del sector automotor, teniendo en cuenta que el níquel es retirado en un porcentaje mayor al 80% en la región donde se eliminan en mayor proporción los contaminantes analizados.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Centro Integrado para el Desarrollo de la Investigación (CIDI) de la UPB sede Medellín (Colombia) por financiar este estudio.

REFERENCIAS

- Aber, S.; Amani-Ghadim, A. R. and Mirzajani, V. (2009). "Removal of Cr (VI) from polluted solutions by electrocoagulation: Modeling of experimental results using artificial neural network", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 171, No. 1-3 (November), pp. 484-490.
- Akbal, F. and Camci, S. (2011). "Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation", *Desalination*, vol. 269, No. 1-3 (March), pp. 214-222.
- APHA-AWWA-WEF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington: 21th edition, 2005. 1368 p.

- Benhadji, A.; Ahmed, M. T. and Maachi, R. (2011). "Electrocoagulation and effect of cathode materials on the removal of pollutants from tannery wastewater of Rouïba", *Desalination*, vol. 277, No. 1-3 (August), pp. 128-134.
- Buttb, J. N. and Lester, J. M. (1994). "Anthropogenic heavy metals inputs to lowland river systems, a case study: The River Stour, U. K", *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 78, No. 3-4 (December), pp. 279-296.
- Cheng, H. (2006). "Cu (II) Removal from lithium bromide refrigerant by chemical precipitation and electrocoagulation", *Separation and Purification Technology*, vol. 52, No. 1 (November), pp. 191-195.
- Chou, W.; Wang, C.; Chang, W. and Chang, S. (2010). "Adsorption treatment of oxide chemical mechanical polishing wastewater from a semiconductor manufacturing plant by electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 180, No. 1-3 (August), pp. 217-224.
- Dekov, V. M.; Araújo, F.; Van Grieken, R. and Subramanian, V. (1998). "Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvery and Brahmaputra rivers (India)", *Science of the Total Environment*, vol. 212, No. 2-3 (April), pp. 89-105.
- Escobar, C.; Soto-Salazar, C. and Toral, M. I. (2006). "Optimization of the electrocoagulation process for the removal of copper, lead and cadmium in natural waters and simulated wastewater", *Journal of Environmental Management*, vol. 81, No. 4 (December), pp. 384-391.
- Fuchs, S.; Haritopoulou, T.; Schäfer, M. and Wihelmi, M. (1997). "Heavy metals in freshwater ecosystems introduced by urban rainwater runoff-monitoring of suspended solid river sediment and biofilms", *Water Science and Technology*, vol. 36, No. 8-9 (August-September), pp. 277-282.
- Hanay, Ö. and Hasar, H. (2011). "Effect of anions on removing Cu²⁺, Mn²⁺ and Zn²⁺ in electrocoagulation process using aluminum electrodes", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, No. 1-2 (May), pp. 572-576.
- Heidmann, I. and Calmano, W. (2008a). "Removal of Cr (VI) from model wastewaters by electrocoagulation with Fe electrodes", *Separation and Purification Technology*, vol. 61, No. 1 (June), pp. 15-21.
- Heidmann, I. and Calmano, W. (2008b). "Removal of Zn (II), Cu (II), Ni (II), Ag (I) and Cr (VI) present in aqueous solutions by aluminium electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, No. 3 (April), pp. 934-941.
- Heidmann, I. and Calmano, W. (2010). "Removal of Ni, Cu and Cr from a galvanic wastewater in an electrocoagulation system with Fe- and Al-electrodes", *Separation and Purification Technology*, vol. 71, No. 3 (March), pp. 308-314.
- Ilhan, F.; Kurt, U.; Apaydin, O. and Gonullu, M. T. (2008). "Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum and iron electrodes", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, No. 1-3 (June), pp. 181-189.
- Ittekkot, V. and Laane, R. "Fate of riverine particulate organic matter". In: *Biogeochemistry of major world rivers*, edited by Degens, E.; Kempe, S. and Richey, J. (eds.). SCOPE Report 42. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. pp. 233-243.
- Kabdaşlı, I.; Arslan, T.; Ölmez-Hancı, T.; Arslan-Alaton, I. and Tunay, O. (2009). "Complexing agent and heavy metal removals from metal plating effluent by electrocoagulation with stainless steel electrodes", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 165, No. 1-3 (June), pp. 838-845.
- Keshmirizadeh, E.; Yousefi, S. and Rofouei, M.K. (2011). "An investigation on the new operational parameter effective in Cr (VI) removal efficiency: A study on electrocoagulation by alternating pulse current", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 190, No. 1-3 (June), pp. 119-124.
- Khelifa, A.; Moulay, S. and Naceur, A. (2005). "Treatment of metal finishing effluents by the electroflotation technique", *Desalination*, vol. 181, No. 1-3 (September), pp. 27-33.
- Labanowski, J.; Pallier, V. and Feuillade-Cathalifaud, G. (2010). "Study of organic matter during coagulation and electrocoagulation processes: Application to a stabilized landfill leachate", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 179, No. 1-3 (July), pp. 166-172.
- Meas, Y.; Ramírez, J.A.; Villalon, M.A. and Chapman, T.W. (2010). "Industrial wastewaters treated by electrocoagulation", *Electrochimica Acta*, vol. 55, No. 27 (November), pp. 8165-8171.
- Mercado, I. y Ordóñez, P. (2007). "Depuración de la materia orgánica. Método de biodiscos us. tratamiento de electrocoagulación", *Residuos*, No. 101 (noviembre-diciembre), pp. 68-70.
- Mercado, I.; Reyes, D. y Agrono, V. (2008). "La Electrocoagulación, una alternativa para la depuración de lixiviados", *Residuos*, No. 107 (septiembre-octubre), pp. 56-58.
- Mercado, I.; Arango, Á. y Toro, M. (2009). "Eliminación de níquel y materia orgánica de vertidos industriales mediante electrocoagulación: estudio preliminar", *Ingeniería Química*, vol. 41, No. 472 (junio), pp. 102-107.



- Mercado, I. y Rivera, N. (2010). "Estudio preliminar para tratar los lixiviados de un relleno sanitario: reactor de lodos activados vs. Electrocoagulación", *Residuos*, No. 116 (abril), pp. 42-45.
- Mercado, I.; Arango, Á. y Ríos, J. (2010). "Reactor de electrocoagulación versus reactor fisicoquímico. Estudio comparativo para eliminar el níquel de las aguas residuales", *Tecnología del Agua*, No. 332 (septiembre), pp. 50-52.
- Merzouk, B.; Gourich, B.; Sekki, A.; Madani, K. and Chibane, M. (2009). "Removal turbidity and separation of heavy metals using electrocoagulation-electroflotation technique: A case study". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 164, No. 1 (May), pp. 215-222.
- Moreno-Casillas, H.; Cocke, D.L.; Gomes, J.; Morkovsky, P.; Parga, J.R. and Peterson, E. (2007). "Electrocoagulation mechanism for COD removal", *Separation and Purification Technology*, vol. 56, No. 2 (August), pp. 204-211.
- Mouedhen, G.; Feki, M.; De Petris-Wery, M. and Ayedi, H.F. (2009). "Electrochemical removal of Cr (VI) from aqueous media using iron and aluminum as electrode materials: Towards a better understanding of the involved phenomena", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 168, No. 2-3 (September), pp. 983-991.
- Noubactep, C. and Schöner, A. (2010). "Metallic iron for environmental remediation: Learning from electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 175, No. 1-3 (March), pp. 1075-1080.
- Sasson, M.B.; Calmano, W. and Adin, A. (2009). "Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 171, No. 1-3 (November), pp. 704-709.
- Şengil, I.; Kulaç, S. and Özacar, M. (2009). "Treatment of tannery liming drum wastewater by electrocoagulation", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 167, No. 1-3 (August), pp. 940-946.
- Top, S.; Sekman, E.; Hoşver, S. and Bilgili, M.S. (2011). "Characterization and electrocoagulative treatment of nanofiltration concentrate of a full-scale landfill leachate treatment plant", *Desalination*, vol. 268, No. 1-3 (March), pp. 158-162.
- Vasudevan, S.; Lakshmi, J. and Sozhan, G. (2011). "Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 192, No. 1 (August), pp. 26-34.
- Warren, L. (1981). "Contamination of sediments by lead, zinc and cadmium: A review", *Environment Pollution Series B, Chemical and Physical*, vol. 2, No. 6 (November), pp. 401-436.
- Zaroual, Z.; Chaair, H.; Essadki, A.H.; El Ass, K. and Azzi, M. (2009). "Optimizing the removal of trivalent chromium by electrocoagulation using experimental design", *Chemical Engineering Journal*, vol. 148, No. 2-3 (May), pp. 488-495.
- Zodi, S.; Potier, O.; Lapticque, F. and Leclerc, J. (2010). "Treatment of the industrial wastewaters by electrocoagulation: Optimization of coupled electrochemical and sedimentation processes", *Desalination*, vol. 261, No. 1-2 (October), pp. 186-190.
- Zongo, I.; Leclerc, J.; Maïga, H.A.; Wéthé, J. and Lapticque, F. (2009). "Removal of hexavalent chromium from industrial wastewater by electrocoagulation: A comprehensive comparison of aluminium and iron electrodes", *Separation and Purification Technology*, vol. 66, No. 1 (April), pp. 159-166.