



# Influencia de la conductividad eléctrica en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea\*

Alvaro Arango Ruíz<sup>1</sup> / Luis Fernando Garcés Giraldo<sup>2</sup>

*Influence of electric conductivity in the electro coagulation of waste water from dairy industries*

*influência da condutividade elétrica na electro- coagulação de águas residuais da indústria láctea*

## RESUMEN

**Introducción.** Efluentes líquidos de diferentes procesos industriales se han tratado por electrocoagulación, obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes. En especial se ha estudiado esta técnica en el tratamiento de las aguas residuales de la industria láctea. La electrocoagulación es un tratamiento que permite la remoción de la carga contaminante de los efluentes líquidos aplicando corriente eléctrica al medio acuoso, lo que propicia la desestabilidad de las cargas eléctricas de los sólidos disueltos y en suspensión, provocando así su precipitación para una posterior separación. Son varios los parámetros a controlar en este proceso, como el pH, la conductividad eléctrica y la densidad de corriente, entre otros.

---

\*Investigación financiada con el apoyo del Fondo de investigaciones de la Corporación Universitaria Lasallista.

<sup>1</sup> Ingeniero Químico. Especialista en Ingeniería Ambiental. Magíster en Ingeniería Área Ambiental. Docente Coordinador del programa de Ingeniería Ambiental. Director Grupo de Investigación GAMA. Corporación Universitaria Lasallista. <sup>2</sup>Ingeniero Sanitario. Magíster en Ingeniería Ambiental. Decano de la Facultad de Ingenierías. Investigador del Grupo GAMA. Corporación Universitaria Lasallista.

Correspondencia: Alvaro Arango Ruíz. e-mail: alarango@lasallista.edu.co

Fecha de recibo: 01/11/09; fecha de aprobación: 18/11/09

**Objetivo.** Estudiar la influencia de la conductividad eléctrica de las aguas residuales de la industria láctea en la remoción de la DQO.

**Materiales y métodos.** Se trataron aguas residuales de la industria láctea por electrocoagulación empleando un diseño experimental factorial  $3 \times 2 \times 3$ , que obedece a variaciones de conductividad, densidad de corriente y tiempo de tratamiento. La variable de respuesta medida fué el porcentaje de remoción de DQO.

**Resultados.** el porcentaje de remoción de DQO se favoreció con el aumento de la densidad de corriente de 32.42 a 43.23 A/m<sup>2</sup> y un tiempo de tratamiento de 15 minutos. Respecto a la conductividad del medio acuoso, se observó también un aumento de la remoción al aumentar este parámetro de 1.5 a 2.5 S/cm, pero cuando se aumentó hasta 3.5 S/cm lo que se observó fué una disminución en la remoción. Esto indica que un aumento de la conductividad por encima de 2.5 S/cm deja de ser efectivo para la eficiencia en la remoción de DQO.

**Conclusión.** Los resultados de este estudio permiten establecer que el nivel óptimo para el tratamiento por electrocoagulación de las aguas residuales de la industria láctea se presenta a 15 minutos de tratamiento, conductividad de 2.5 S/cm y densidad de corriente de 43,23 A/m<sup>2</sup>, dando como resultado una remoción de DQO de 95.9 %.

**Palabras clave:** electrocoagulación, conductividad eléctrica, aguas residuales de la industria láctea.

## ABSTRACT

Liquid effluents from several industrial processes have been treated by the use of electro coagulation, obtaining promising results in the removal of pollutants. This technique has been especially studied in the treatment of waste water from dairy industries. Electro coagulation is a treatment that allows the removal of pollutants from liquid effluents, by applying electric energy into the liquid and, thus, destabilizing the electric loads of the suspended and dissolved solids, producing their precipitation to the bottom and making their separation possible. There are several parameters to control in this process, such as pH, electric conductivity and electric current density, among others.

**Objective.** To study the influence of electric conductivity of waste water from dairy industries in the removal of COD.

**Materials and methods.** Waste water from dairy industries was treated with electro coagulation, using an experimental factorial  $3 \times 2 \times 3$  design that acts according to the variations of conductivity, current density and treatment time. The response variables measured were the COD removal percentages.

**Results.** The percentage of COD removal was favored with the increase of current density from 32.42 to 43.23 A/m<sup>2</sup> at a 15 minutes treatment time. Concerning the conductivity of the aqueous medium, it was also observed a higher removal rate when this parameter was increased from 1.5 to 2.5 S/cm, but when it was increased to 3.5 S/cm a reduction in the removal was observed. This indicates that a conductivity increase above 2.5 S/cm is not effective for the COD removal efficiency.

**Conclusion.** The result of this study allows to say that the optimal level for treating waste water from dairy industries by the use of electro coagulation is achieved at a 15 minutes treatment time, 2.5 S/cm conductivity and a 43.23 current density. It results in a COD removal of 95.9%.

**Key words:** Electro coagulation, electric conductivity, waste water from dairy industries.

## RESUMO

**Introdução.** Efluentes líquidos de diferentes processos industriais se trataram por electrocoagulação obtendo resultados alentadores na remoção de contaminantes, em especial se estudou esta técnica no tratamento das águas residuais da indústria láctea. A electrocoagulação é um tratamento que permite a remoção do ônus contaminante dos efluentes líquidos, aplicando corrente elétrica ao meio aquoso, o que propicia a desestabilidade dos ônus elétricos dos sólidos dissolvidos e em suspensão, provocando sua precipitação para uma posterior separação. São variados os parâmetros a controlar neste processo como são o PH, a condutividade elétrica e a densidade de corrente entre outros.

**Objetivo.** Estudar a influência da condutividade elétrica das águas residuais da indústria láctea na remoção da DQO.

**Materiais e métodos.** Trataram-se águas residuais da indústria láctea por electrocoagulação empregando um desenho experimental fatorial  $3 \times 2 \times 3$  que obedece a variações de condutividade densidade de corrente e tempo de tratamento. As variáveis de resposta medidas foram percentagens de remoção de DQO.

**Resultados.** a percentagem de remoção de DQO se favoreceu com o aumento da densidade de corrente de 32.42 a 43.23 A m<sup>2</sup>/e um tempo de tratamento de 15 minutos. Com respeito à condutividade do meio aquoso, observou-se também um aumento da remoção ao aumentar este parâmetro de 1.5 a 2.5 S/cm, mas quando se aumenta até 3.5 S/cm o que se observa é uma diminuição na remoção, isto indica que um aumento da condutividade acima de 2.5 S/cm deixa de ser efetivo para a eficiência na remoção de DQO.

**Conclusão.** Os resultados deste estudo permitem estabelecer que o nível ótimo para o tratamento por electrocoagulação das águas residuais da indústria láctea se apresenta para 15 minutos de tratamento, condutividade de 2.5 S/cm e densidade de corrente de 43,23 A m<sup>2</sup>, dando como resultado uma remoção de DQO de 95.9 %.

**Palavras importante:** Electrocoagulação, condutividade elétrica, águas residuais da indústria láctea.

## INTRODUCCIÓN

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de diversas aguas residuales. En este proceso son removidos los contaminantes que se encuentran suspendidos, emulsionados o disueltos en el medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados<sup>1-3</sup>. Sin embargo en este caso no se hace uso de un coagulante químico, cuya función es llevada a cabo por la corriente eléctrica aplicada al medio contaminado.

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 menos 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 estos iones metálicos tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados <sup>4</sup>.

Los efluentes líquidos de diferentes procesos industriales han sido tratados mediante electrocoagulación, obteniendo resultados alentadores en la remoción de contaminantes, hecho que ha despertado el interés de la industria por investigar e implementar esta tecnología en el tratamiento de sus aguas residuales <sup>5</sup>.

Son muchos los factores que intervienen en el proceso de electrocoagulación, algunos de ellos con mayor influencia sobre el proceso. A continuación se presentan aquellos que se relacionan más directamente con la efectividad de éste.

**pH:** el pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar un hidróxido <sup>3</sup>. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de electrocoagulación y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar <sup>6-8</sup>. El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo<sup>6,9</sup>. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer a su vez y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

Las reacciones que se dan durante el proceso de electrocoagulación le dan al medio acuoso capacidad buffer, especialmente en aguas residuales alcalinas. Esta propiedad previene grandes cambios de pH, con lo cual son menores las dosificaciones de sustancias químicas para regular el pH.

**Densidad de corriente:** como las variables eléctricas en el proceso de electrocoagulación son los parámetros que más influyen en la remoción del contaminante de un agua residual y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio<sup>1</sup>.

La eficiencia en la remoción y el consumo de energía aumentan con el incremento en la densidad de corriente<sup>10,11</sup>. Para algunas conductividades del medio acuoso, el consumo de energía incrementa proporcionalmente con los incrementos de conductividad, lo que conlleva a un consumo de mayor energía. Para altos consumos de energía se presentan pérdidas por la transformación de energía eléctrica en calórica, produciéndose un aumento en la temperatura del medio acuoso <sup>12</sup>.

El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio,  $Al^{+3}$ , o hierro,  $Fe^{+2}$ , liberados por los respectivos electrodos.

En general, un aumento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante <sup>8</sup>. Una densidad de corriente demasiado grande

produciría una disminución significativa en la eficacia. La selección de la densidad de corriente podría realizarse teniendo en cuenta otros parámetros de operación, como pH y temperatura<sup>3</sup>.

La energía eléctrica que se suministra a la celda electroquímica puede aplicarse mediante corriente alterna (CA) o bien como corriente directa (CD). Las características propias del paso de cada una de las corrientes a través del medio acuoso generan diferentes respuestas electroquímicas entre las placas y el agua residual tratada. Cuando se suministra corriente directa se produce en el cátodo una impermeabilización, lo que causa una menor eficiencia en la remoción<sup>13</sup>.

**Conductividad eléctrica:** un aumento en la conductividad eléctrica genera un incremento en la densidad de corriente cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación. Adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, produce una disminución del voltaje aplicado<sup>8,14</sup>.

La adición de algunos electrolitos tales como NaCl o CaCl<sub>2</sub> genera un aumento en la conductividad del agua residual<sup>11</sup>. Adicionalmente se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup> produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos que aumentaría el potencial entre éstos, decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl<sup>-</sup> alrededor del 20%<sup>3</sup>.

**Temperatura:** los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente se incrementa inicialmente hasta llegar a 60° C, punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo<sup>13</sup>.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para este estudio se utilizó un agua residual de una industria láctea de la región. Se tomaron tres muestras del tanque de homogenización de las aguas residuales de esta industria, se ajustó el pH a 5 con la adición de ácido sulfúrico, ya que de acuerdo con investigaciones previas se determinó que a este pH se obtiene una mayor remoción de materia orgánica en el proceso de electrocoagulación de las aguas residuales lácteas,<sup>15</sup> y la conductividad se ajustó con cloruro de sodio a valores predeterminados.

El tratamiento de las aguas se llevó a cabo en un sistema para electrocoagulación tipo Bach para dos litros de agua residual. El sistema cuenta con tres placas de

hierro como electrodo de sacrificio, intercaladas y dispuestas en paralelo con otras tres placas de aluminio.

El porcentaje de remoción para la DQO (Demanda Química de Oxígeno) se determinó midiendo este parámetro antes y después de cada tratamiento por el método de micro-DQO colorimétrico y fue corregida por las interferencias de hierro<sup>16</sup>.

Las variables que se consideraron como factores para el diseño experimental fueron: densidad de corriente eléctrica, conductividad del medio acuoso y tiempo de tratamiento, manteniendo como electrodo de sacrificio al hierro (ánodo) y como cátodo al aluminio.

El diseño experimental utilizado en la investigación es un diseño factorial de tres factores (densidad de corriente, conductividad del medio acuoso y tiempo), completamente al azar<sup>17</sup>. Los niveles para cada uno de estos factores se consignan en la tabla I. Para cada uno de los experimentos se realizaron tres repeticiones. La variable de respuesta fue el porcentaje de remoción de DQO.

**Tabla I. Factores y niveles en el diseño experimental.**

Factores	Niveles		
Densidad de corriente (A/m <sup>2</sup> )	32.43	43.23	
Conductividad S/cm	1.5	2.5	3.5
Tiempo (min)	5	10	15

Para el análisis estadístico se empleó un modelo de tres factores, efectos fijos completamente aleatorizados, con tres replicas, el nivel de confianza del 95% y la potencia para detectar diferencias significativas de 100%:

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijkl} \quad \varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma^2)$$

$$i = 1, \dots, 7; \quad j = 1, 2, 3; \quad k = 1, 2, 3; \quad l = 1, 2, 3$$

Donde:

- $y_{ij}$  = denota la k-ésima observación del ij-ésimo tratamiento
- $\mu$  = media global
- $\alpha_i$  = efecto del factor tiempo con tres niveles
- $\beta_j$  = efecto del factor conductividad
- $\gamma_k$  = efecto del factor densidad de corriente
- $(\alpha\beta)_{ij}$  = interacción entre el tiempo y conductividad

$(\alpha\gamma)_{ik}$  = interacción entre el tiempo y densidad de corriente

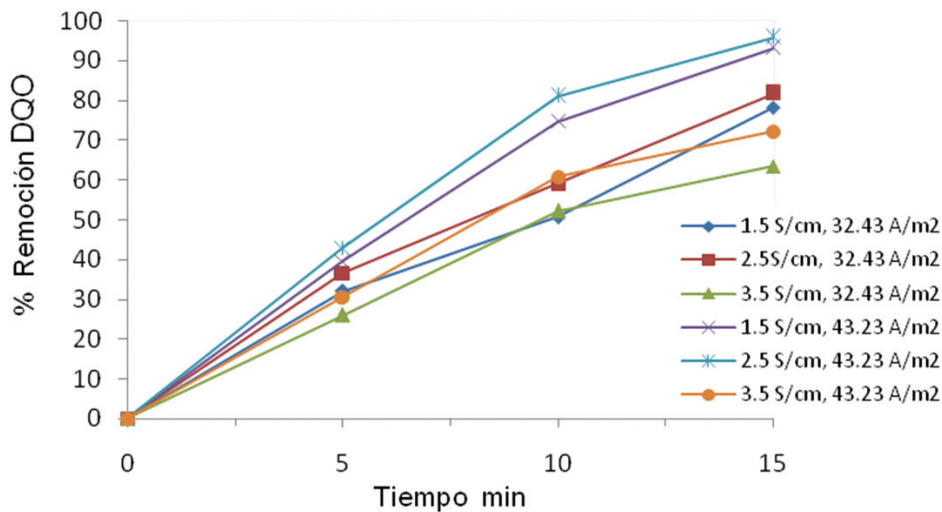
$(\beta\gamma)_{jk}$  = interacción entre conductividad y densidad de corriente

$\varepsilon_{ijkl}$  = error experimental

Los términos  $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k$  son los efectos principales y  $(\alpha\beta)_{ij}, (\beta\alpha)_{ji}, (\beta\gamma)_{jk}$  son los efectos de interacción de los factores.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la gráfica I se muestran los resultados experimentales obtenidos de la remoción de DQO mediante la aplicación del proceso de electrocoagulación a las aguas residuales de la industria láctea, variando los parámetros de densidad de corriente eléctrica, conductividad del medio acuoso y tiempo de proceso de acuerdo al diseño experimental establecido.



**Gráfica I. Porcentajes de remoción de DQO variando densidad de corriente, conductividad y tiempo**

De la gráfica I se puede apreciar que el porcentaje de remoción de DQO se favorece con el aumento de la densidad de corriente de 32.42 a 43.23 A/m² y un tiempo de tratamiento de 15 minutos. Respecto a la conductividad del medio acuoso, se observa también un aumento de la remoción al aumentar este parámetro de 1.5 a 2.5 S/cm, pero cuando se aumenta hasta 3.5 S/cm lo que se observa es una disminución en la remoción. Esto indica que un aumento de la conductividad por encima de 2.5 S/cm deja de ser efectivo para la eficiencia en la remoción de DQO. El porcentaje de remoción de DQO alcanza un valor máximo

de 95.9% para una densidad de corriente de 43.23 A/m<sup>2</sup> en un tiempo de 15 minutos y una conductividad de 2.5 S/cm.

Para las dos densidades de corriente eléctrica trabajadas, y a 15 minutos de tratamiento, se observa que los porcentajes de remoción a 3.5 S/cm son menores a los obtenidos a 1.5 S/cm.

Cuando la conductividad se aumenta de 1.5 a 2.5S/cm se observan pequeños aumentos en la remoción de DQO. Por el contrario, cuando se aumenta la conductividad de 2.5 a 3.5 S/cm se presentan grandes disminuciones en la remoción de DQO.

En la tabla 2 se presenta el análisis de varianza. En ésta se observa cómo el valor p resulta menor que 0.05, para los efectos principales: tiempo acumulado (minutos), densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>), conductividad (S/cm) y sus interacciones, con lo cual se puede afirmar que estos efectos y sus interacciones son significativos, o sea que el cambio en el tiempo acumulado, densidad de corriente (A/m<sup>2</sup>) y conductividad (S/cm), así como sus interacciones, son factores que influyen significativamente en la respuesta del experimento. Como las interacciones son significativas no se puede evaluar los efectos principales por separado. Por lo tanto, en la gráfica 2 se presenta el análisis de las interacciones para cada variable respuesta.

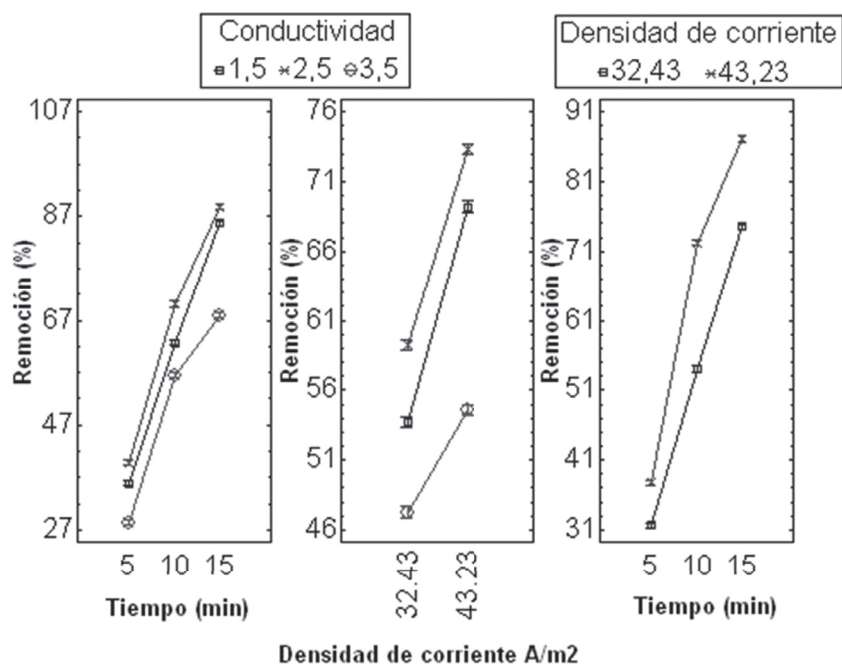
En esta gráfica 2 se observa cómo el porcentaje de remoción aumenta con el aumento del tiempo, densidad de corriente y la conductividad hasta un valor de 2.5 S/cm, pero disminuye por encima de este valor de conductividad del medio acuoso.

Con la metodología de la pendiente ascendente se obtuvieron los valores de los factores que optimizan la variable respuesta. La combinación de densidad, tiempo y conductividad que genera el máximo o mínimo de remoción se presenta en la tabla 3 y la superficie de repuestas se presenta en la gráfica 3.

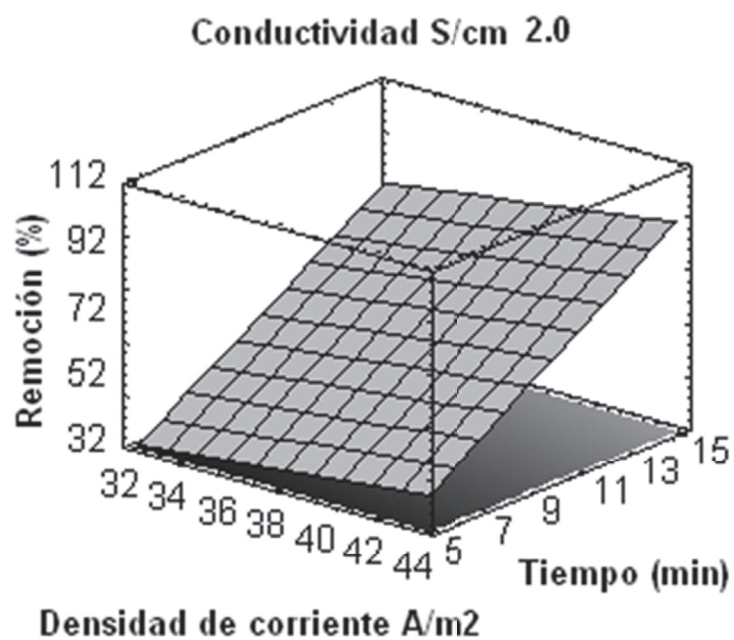
**Tabla 2. Análisis de varianza modelo de tres factores, efectos fijos completamente aleatorizado**

Fuente de variación	S.S.	g.l.	C.M.	Val. F	Val. p
A: Conductividad	1479,48	2	739,739	267,30	0,0000
B: Densidad de corriente	1361,61	1	1361,61	492,01	0,0000
C: Tiempo	12976,0	2	6487,99	2344,42	0,0000
A*B	114,762	2	57,3808	20,73	0,0000
A*C	188,631	4	47,1578	17,04	0,0000
B*C	219,935	2	109,967	39,74	0,0000
Error	60,8833	22	2,76742		
Total	16401,3	35			

R<sup>2</sup> = 2 = 0,9962    R<sup>2</sup> ajustado = 0,9940



**Gráfica 2. Remoción vs densidad, conductividad y tiempo**



**Gráfica 3. Superficies de respuesta que relaciona la densidad, la conductividad y tiempo**

El máximo y mínimo en porcentaje de remoción se presenta cuando se trabaja en las condiciones de densidad, tiempo y conductividad que se presentan en la tabla 3.

**Tabla 3. Combinación de densidad, tiempo y conductividad**

Variables	Niveles		Óptimo	
	Mínimo	Máximo	Máximo	Mínimo
Densidad (A/m <sup>2</sup> )	32,43	43,23	43,23	38,79
Tiempo (min)	5,0	15,0	15,0	5,0
Conductividad (S/cm)	1,5	3,5	2,5	3,5

## CONCLUSIONES

Los tres factores bajo estudio (conductividad, densidad de corriente y tiempo) tienen un efecto significativo sobre la remoción de DQO en las aguas residuales lácteas. La remoción de DQO incrementa, cuando hay aumento en la conductividad del medio acuoso cercano a 2.5 S/cm, pero por encima de este valor se obtienen menores remociones de DQO. Incluso cuando la conductividad alcanza 3.5 S/cm, la remoción de DQO es menor que la obtenida a 1.5 S/cm. El nivel óptimo del estudio se presenta para 15 minutos de tratamiento, conductividad de 2.5 S/cm y densidad de corriente de 43,23 A/m<sup>2</sup>, dando como resultado una remoción de DQO de 95.9 %.

Los mayores porcentajes de remoción de la carga contaminante de las aguas residuales de la industria láctea se dan dentro del rango de la conductividad natural de dichas aguas.

La electrocoagulación es una tecnología que se presenta como una alternativa eficiente en el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HOLT, Peter K.; BARTON, Geoffrey W. and MITCHELL, Cynthia A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. *En: Chemosphere* April, 2005, vol.59, no. 3, p.355–367
2. RAJESHWAR, Krishnan and IBANEZ, Jorge. *Environmental electrochemistry: fundamentals and applications in pollution abatement*. San Diego California: Academic Press Limited, 1997; 776p.
3. CHEN, Guohua. *Electrochemical technologies in wastewater treatment*. *En: Separation and Purification Technology*. Julio, 2004, vol. 38, no. 1, p. 11–41

4. STEPHENSON, Rob and TENNANT, Bruce. New electrocoagulation process treats emulsified oily wastewater at Vancouver Shipyards. En: Environmental Science & Engineering. Enero, 2003.
5. HOLT, Peter K; BARTON, Geoffrey and MITCHELL, Cynthia. Electrocoagulation as a Wastewater Treatment. En: Annual Australian Environmental Engineering Research Event. (3: 23-26, November: Castlemaine, Victoria). Castlemaine, Victoria; 1999.
6. GE, Jiantuan, et al. New bipolar electrocoagulation– electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004, vol. 36, no. 1, p.33–39
7. KOBYA, Mehmet; CAN, Orhan Taner and BAYRAMOGLU, Mahmut. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. En: Journal of Hazardous Materials. Junio, 2003, vol. 100, no. 1-3 p.163– 178
8. BAYRAMOGLU, Mahmut, et al. Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. En: Separation and Purification Technology. 2004, vol.37, no. 2, p.117–125
9. KUMAR, P. Ratna, et al. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. En: Chemosphere. Junio, 2004, vol. 55, no. 9, p.1245–1252
10. ADHOUM, Nafaâ and MONSER, Lotfi .Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. En: Chemical Engineering and Processing. 2004, vol. 43, no. 10, p.1281-1287
11. YILMAZ, A. Erdem et al. The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. En: Journal of Hazardous Materials. October, 2005, vol. 125, no. 1-3, p.160-165
12. LARUE, O. et al. Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. En: Separation and Purification Technology. 2003, vol. 31, no. 2, p.177-192
13. MOLLAH, M. Yousuf A , et al. Electrocoagulation (EC) science and applications. En: Journal of Hazardous Materials June, 2001, vol. 84, no. 1, p. 29–41.
14. CHEN, Xueming; CHEN, Guohua, and YUE, Po Lock. Investigation on the electrolysis voltage of electrocoagulation. En: Chemical Engineering Science. July, 2002, vol. 57, no. 13, p. 2449–2455.
15. ARANGO RUÍZ, Álvaro de Jesús y GARCÉS GIRALDO, Luis Fernando. Tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. En: Ingeniería Química. 2008, no. 458, p.180-186



16. CIESCERI, Leonore S. and EATON, Andrew. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18 ed. Washington: EPHA-AWWA-WPCF, 1992. 3-115p.
17. MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. México: Grupo Editorial Iberoamérica, 2002. 915 p.