

# Evaluation of the Efficiency of an Electrocoagulation Cell for the Treatment of Wastewater coming from the Textile Industry

Zelada Romero Henry Michel, Mag.<sup>1</sup>, Vázquez Cristina, Dra.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratorio de Química de Sistemas Heterogéneos (LaQuiSiHe), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, hzelada.ext@fi.uba.ar, cvazquez@fi.uba.ar

**Abstract-** The efficiency of an electrocoagulation cell was evaluated by obtaining the optimum operating parameters for the contaminant removal from wastewater coming from the textile industry. A batch-type electrochemical cell was designed with aluminum electrodes and a parallel monopolar configuration type. The Response Surface Methodology with a Rotable Composite Central Design was used to evaluate the treatment time, chloride concentration and voltage for the turbidity and color removal, chemical oxygen demand (COD) and total suspended solids (TSS). The results showed that, during an operation time of 16.5 minutes, with a sodium chloride (NaCl) concentration of 29.8 g/L and applying a voltage of 18 V, it is possible to reduce 98% turbidity, 99% color intensity, 97% COD and 96% TSS. In addition, after the electrocoagulation treatment, an energy consumption and a specific energy consumption required for the treatment of a 3 L wastewater sample was 0.02 kW/h and 6.6 kW/h/m<sup>3</sup>, respectively; and an efficiency of the aluminum anode with values between 91% and 93%.

**Keywords:** Electrocoagulation; response surface methodology; operating parameters; contaminant removal; color removal; textile industry.

**Digital Object Identifier:** (only for full papers, inserted by LACCEI).

**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).

**DO NOT REMOVE**

# Evaluación de la Eficiencia de una Celda de Electrocoagulación para el Tratamiento de las Aguas Residuales de la Industria Textil

Zelada Romero Henry Michel, Mag.<sup>1</sup>, Vázquez Cristina, Dra.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Laboratorio de Química de Sistemas Heterogéneos (LaQuiSiHe), Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires, Argentina, hzelada.ext@fi.uba.ar, cvazquez@fi.uba.ar

**Resumen-** Se evaluó la eficiencia de una celda de electrocoagulación a partir de la obtención de los parámetros óptimos de operación para la remoción de contaminantes de aguas residuales de la industria textil. Para ello, se diseñó una celda de electrocoagulación tipo batch, con electrodos de aluminio y un tipo de configuración de los electrodos monopolar en paralelo. Se utilizó la Metodología de Superficie de Respuesta con un Diseño Central Compuesto Rotable, para evaluar el tiempo de tratamiento, la concentración de cloruros y el voltaje en la remoción de la turbidez, color, demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos totales (SST). Los resultados demostraron que, durante un tiempo de operación de 16,5 minutos, con una concentración de cloruro de sodio de 29,8 g/L y aplicando una tensión de 18 V, se logra reducir un 98% la turbidez, un 99% la intensidad del color, un 97% la DQO y un 96% los SST. El consumo energético y el consumo energético específico requerido para el tratamiento de un volumen de muestra de agua residual de 3 L fue de 0,02 kWh y 6,6 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente, y una eficiencia del ánodo de aluminio con valores entre el 91% y el 93%.

**Palabras clave:** Electrocoagulación; metodología de superficie de respuesta; parámetros de operación; remoción de contaminantes; remoción de color; industria textil.

## I. INTRODUCCIÓN

Los problemas de contaminación de agua son una gran amenaza para el ambiente y los seres vivos y afectan a los países desarrollados y a los en vías de desarrollo. Se estima que, en todo el mundo, más del 80% de todas las aguas residuales municipales e industriales regresan al medio sin recibir tratamiento [1].

En términos generales, las industrias son potenciales fuente de contaminación por las características de los procesos que realizan, por lo cual es necesario disponer de sistemas de tratamiento de sus efluentes [2] [3]. Entre ellas, la industria textil, se considera una de las más contaminantes por emplear tintes textiles y sustancias que afectan en gran manera la condición natural del agua [4].

Esta contaminación a los cuerpos de agua se debe principalmente a las etapas de corte, desinfección, lavado, blanqueado, mercerizado, teñido, impresión y refinamiento, siendo la etapa de teñido o tinturado la que presenta una mayor generación de contaminantes [5]. Se estima que casi tres cuartas partes del agua consumida en la etapa de teñido termina convirtiéndose en un residuo no potable [6], con altas concentraciones de colorantes de origen sintético [7].

Además, de su alta coloración, los efluentes procedentes de la etapa de teñido, se caracterizan por su alto contenido en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO), pH y salinidad [8], que a menudo son descargados en los sistemas de alcantarillado sin recibir tratamiento alguno y en el peor de los casos, se descargan directamente a los cuerpos de agua como ríos, lagos, mares, entre otros, causando efectos nocivos en el medio ambiente, la flora y la fauna acuática [3] [8] [9], si no son tratadas. Esto debido a que no solamente representará un problema estético, sino que además interfiere en el proceso fotosintético que realizan algunos organismos [10], ocasionando un fuerte efecto inhibitorio en el crecimiento de microalgas, plantas acuáticas, microorganismos, peces y mamíferos [11] [12], lo que se verá reflejado en la pérdida de especies vegetales y animales que dependen de estas aguas para vivir [12].

La problemática de la contaminación por efluentes coloreados de las industrias textiles radica en la compleja y variada estructura química de los colorantes utilizados por las diferentes industrias textiles, junto a la gran solubilidad que estos tienen en el agua, lo que los vuelve poco o casi nada biodegradables y poco vulnerables a la acción de agentes químicos [2] [12], por lo que elegir un método adecuado para su tratamiento, termina convirtiéndose en un reto debido al tiempo y dinero que implica corregir este problema [4].

Si bien cada tipo de tratamiento tiene sus ventajas y desventajas, el método o proceso que se terminará eligiendo o implementando en una determinada industria textil dependerá de su costo de aplicación y del rendimiento obtenido en relación con el objetivo deseado [7].

A pesar de haber múltiples opciones existentes para el tratamiento de los efluentes coloreados de la industria textil, para la presente investigación se decidió estudiar el método o proceso electroquímico (EQ) de electrocoagulación (EC).

La EC, también conocida como la coagulación asistida electroquímicamente, es un proceso EQ en el que las partículas contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, son desestabilizadas mediante la aplicación de una corriente eléctrica, que tiene la función de generar el coagulante a partir de un par de electrodos (ánodo y cátodo) [13], que se encuentran conectados a una fuente de poder [14] [15] [16].

Estos procesos se llevan a cabo en una celda electroquímica, donde se consume energía eléctrica para que se

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

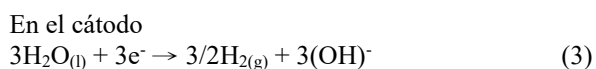
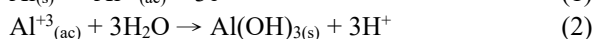
DO NOT REMOVE

lleve a cabo una reacción redox no espontánea [15]. Todos los procesos físicos y químicos que se desarrollan dentro de una celda de electrocoagulación (CECG) se deben a una serie de reacciones que ocurren tanto en el ánodo como en el cátodo. En el ánodo se producen los iones metálicos que, por oxidación electrolítica, dan origen a la sustancia química que hace las veces de coagulante [13] [14]; mientras que en el cátodo se generan gases electrolíticos, especialmente hidrógeno [13].

De acuerdo con las referencias [13] [17], durante un proceso de electrocoagulación (ECG) se desarrollan tres etapas: al inicio del tratamiento se producen las reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo, luego se produce la formación de coagulantes en la fase acuosa y, finalmente, los coagulantes adsorben a los contaminantes solubles o coloidales y se remueven por sedimentación o por flotación.

En la EC, se pueden usar diferentes metales o materiales como electrodos, siendo los materiales más utilizados el aluminio (Al) y el hierro (Fe) [13] [14].

De acuerdo con las referencias [2] [13] [14], Las principales reacciones que ocurren en un ECG cuando se utilizan electrodos de aluminio son:



El  $\text{Al}(\text{OH})_{3(s)}$  formado en ánodo, tiene la característica de ser una sustancia amorfa y gelatinosa con una gran área superficial, que presenta propiedades absorbentes y que favorecen a los procesos de adsorción y atracción de las partículas contaminantes [2] [13] [14].

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Enfoque, alcance y diseño de la investigación

La presente investigación fue elaborada bajo el planteamiento metodológico del enfoque cuantitativo, con un alcance explicativo y descriptivo, y con un diseño experimental del tipo “puro”, pues es el que mejor se adapta a las necesidades del estudio, para lo cual hicimos uso de un diseño experimental basado en la definición de Metodología de Superficie de Respuesta (MSR), a través del cual se determinaron e identificaron los parámetros óptimos de operación con un esfuerzo experimental acotado.

### B. Construcción de la celda de electrocoagulación

Para la construcción de la CECG, se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1) *Características de la celda construida:* Se construyó una CECG con un sistema tipo *batch* en material de vidrio transparente de 6 mm de espesor, con la capacidad para tratar un volumen de 3 litros de AR. Las dimensiones de la CECG

fueron 20 cm x 10 cm x 20 cm de largo, ancho y altura, respectivamente. Adicionalmente se instaló un tomador de muestras a una altura prudente que nos permitió sacar el efluente tratado y realizar los análisis respectivos.

2) *Especificaciones de los electrodos utilizados:* Se diseñaron 10 electrodos de Al de 2 mm de espesor (5 para el ánodo y 5 para el cátodo). El diseño de los electrodos fue en forma de ‘T’, para los cuales se utilizaron dos soportes de madera con 10 divisiones de 1,4 cm cada uno.

3) *Suministro de corriente eléctrica a la celda:* Se diseñó una fuente de poder regulable de 0 a 12 A y de 0 a 32 V, con una configuración monopolar en paralelo utilizando cables eléctricos de 1,5 mm de espesor, conectados a cocodrilos para facilitar su uso y conexión en cada electrodo.

### C. Preparación de la muestra sintética

Para la preparación del agua residual sintética (ARS), se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

1) Se siguieron los lineamientos propuestos por [18], quienes prepararon una solución de composición similar a la que se encuentra en efluentes textiles procedentes del proceso de teñido o tinturado.

2) Se utilizó el colorante Azul Directo 2 (AZ2), porque es uno de los colorantes más utilizados por las industrias textiles para el teñido de fibras de algodón, seda, cuero y otras [19].

3) Se preparó una cantidad necesaria de ARS que nos permitió determinar los parámetros de operación del ECG y evaluar la eficiencia de la CECG en la remoción de la turbidez, color, DQO, SST, así como la evaluación de la eficiencia del ánodo y el consumo eléctrico.

4) Se realizó la caracterización de la ARS preparada, obteniendo los siguientes valores:

TABLA 1  
CARACTERIZACIÓN DEL ARS

Parámetro	Unidad	Resultado
pH	---	7,1
Color	(UC)	3500
DQO	(g/L)	1,25
SST	(g/L)	0,15
Turbidez	(NTU)	152

5) Por último, el ARS preparada, fue almacenada y guardará en la heladera a 4°C, para su conservación y posterior tratamiento.

### D. Parte experimental

1) *Determinación de las condiciones de operación:* Para determinar los parámetros de operación del ECG se siguieron las siguientes pautas:

1.1) Para cada corrida experimental se utilizó un volumen de ARS determinada y se realizaron repeticiones para determinar los parámetros estadísticos del proceso.

1.2) Los factores considerados como controlables para el presente estudio fueron: el tiempo de tratamiento ( $x_1$ ), la concentración de cloruros ( $x_2$ ) y el voltaje ( $x_3$ ); y, las variables de respuesta a analizar y optimizar fueron: el porcentaje de remoción de la turbidez ( $Y_1$ ), el porcentaje de remoción del color ( $Y_2$ ), el porcentaje de remoción de la DQO ( $Y_3$ ) y el porcentaje de remoción de los SST ( $Y_4$ ).

1.3) Para determinar los parámetros de operación se utilizó la MSR mediante un Diseño Central Compuesto Rotable (DCCR) con tres factores y dos niveles ( $2^3$ ).

1.4) Al tener tres factores controlables con dos niveles cada uno, el número de corridas realizadas fue de 20, de las cuales 8 correspondieron a los puntos factoriales, 6 a los puntos centrales y las otras 6 a los puntos axiales [20].

1.5) Los valores para los rangos y niveles de los factores controlables, se estandarizaron en -1 y 1 para los puntos factoriales, en  $-\alpha$  y  $+\alpha$  para los puntos axiales y en 0 para los puntos centrales.

1.6) Los puntos factoriales -1 y 1 corresponden a los valores codificados, correspondiendo el valor -1 al nivel bajo (valor mínimo o inferior) y el valor +1 al nivel alto (valor máximo o superior). En este sentido, se consideró lo siguiente:

- Para el factor  $x_1$ , para el nivel bajo se consideró un valor de 5 minutos, y para el nivel alto se consideró un valor de 15 minutos.
- Para el factor  $x_2$ , para el nivel bajo se consideró un valor de 20 gramos de Cloruro de Sodio (NaCl) por litro de ARS, y para el nivel alto se consideró un valor de 30 gramos de NaCl por litro de ARS.
- Para el factor  $x_3$ , para el nivel bajo se consideró un valor de 12 V, y para el nivel alto se consideró un valor de 18 V.

Estos valores factoriales (bajos y altos) considerados para cada factor, fueron obtenidos de ensayos previos, los cuales se realizaron con la intención de identificar las condiciones iniciales a considerar como punto de partida en nuestra investigación, y a partir de ellos poder optimizar los parámetros de operación durante el ECG.

1.7) Los puntos centrales '0' corresponden a los valores del punto central que se encuentra entre el valor inferior de la variable (-1) y el valor superior de la variable (+1). En este sentido, se consideró lo siguiente:

- Para el factor  $x_1$ , los puntos centrales (0) corresponden a un valor de 10 minutos.
- Para el factor  $x_2$ , los puntos centrales (0) corresponden a un valor de 25 gramos de NaCl por litro de ARS.
- Para el factor  $x_3$ , los puntos centrales (0) corresponden a un valor de 18 V.

1.8) Los puntos axiales  $-\alpha$  y  $+\alpha$  corresponden a los valores predeterminados para cada diseño de superficie de respuesta. En este sentido, como buscamos que nuestro diseño sea un DCCR, de acuerdo con la referencia [21], el valor que debe tomar  $\alpha$  será igual a:

$$\alpha = (F)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Donde: F: es el número de puntos en la parte factorial.

Para nuestro estudio, el número de puntos factoriales es 8, por lo tanto, el valor de  $\alpha$  será:

$$\alpha = 1,68179. \quad (5)$$

En función al valor de  $\alpha$  calculado, se hizo necesario determinar las variables reales a utilizar en nuestro diseño de experimentos, para ello, se utilizó la siguiente fórmula:

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{\Delta x_i}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k. \quad (6)$$

Donde:  $X_i$ : es el valor de la variable codificada;  $x_i$ : es el valor de la variable real;  $x_{0i}$ : es el valor del punto central;  $\Delta x_i$ : es el valor del cambio de nivel.

En este sentido, para el cálculo del valor del punto central ( $x_{0i}$ ) y del valor del cambio de nivel ( $\Delta x_i$ ), se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$x_{0i} = \frac{x_{(+1)} + x_{(-1)}}{2}. \quad (7)$$

$$\Delta x_i = \frac{x_{(+1)} - x_{(-1)}}{2}. \quad (8)$$

Donde:  $x_{(-1)}$ : es el valor inferior de la variable;  $x_{(+1)}$ : es el valor superior de la variable.

Todos estos valores calculados anteriormente se muestran a continuación (véase Tabla 2).

TABLA 2  
NIVELES DE LOS FACTORES ESTUDIADOS

Factores controlables	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Tiempo ( $x_1$ )	1,591	5	10	15	18,409
NaCl ( $x_2$ )	16,591	20	25	30	33,409
Voltaje ( $x_3$ )	9,954	12	15	18	20,045

1.9) Una vez calculados los valores de las variables reales, con la ayuda del *software* estadístico Minitab (Minitab) se obtuvo todas las combinaciones posibles entre los niveles de las variables que corresponden a un DCCR, con las cuales se procedió a realizar las corridas experimentales de forma aleatoria.

1.10) Conforme se iban realizando las corridas experimentales, se realizó una toma de muestras antes y después de cada estímulo experimental.

1.11) Las muestras recolectadas después de cada corrida experimental fueron analizadas en el laboratorio, y todos los datos obtenidos fueron registrados en la ficha de recolección de datos para su posterior análisis estadístico con Minitab.

1.12) Después de realizado el análisis estadístico, se obtuvo un modelo de superficie de respuesta de segundo orden con los parámetros óptimos de operación. Los modelos de segundo orden obtenidos en el análisis estadístico presentaron la estructura de la siguiente ecuación cuadrática:

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon. \quad (9)$$

Donde:  $Y_i$ : es la variable de respuesta;  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$ ,  $\beta_{ij}$ : son los coeficientes del modelo de regresión;  $x_i$ ,  $x_j$ : son las variables independientes;  $\varepsilon$ : error aleatorio, ruido o error observado en la respuesta ( $Y_i$ ).

2) *Evaluación de la eficiencia de la celda de electrocoagulación*: Una vez determinados los parámetros óptimos de operación a través de la MSR, estos valores calculados fueron validados experimentalmente a través de 4 ensayos adicionales, a fin de validar la eficiencia de la CECG para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil.

En este sentido, para determinar la eficiencia de la CECG se siguió las siguientes pautas:

2.1) Conforme se fueron realizando cada una de las corridas experimentales adicionales, se realizó una toma de muestras antes y después de cada estímulo experimental.

2.2) Las muestras recolectadas antes y después de cada corrida experimental fueron analizadas en el laboratorio, y todos los datos obtenidos se fueron registrando en la ficha de recolección de datos a fin de analizar el grado de remoción de la turbidez, color, DQO y SST.

2.3) La eficiencia del proceso se evaluó midiendo los porcentajes de remoción de la turbidez ( $\%R_T$ ), del color ( $\%R_C$ ), de la DQO ( $\%R_{DQO}$ ) y de los SST ( $\%R_{SST}$ ), del ARS utilizada durante el ECG. Estos porcentajes de remoción, fueron calculados de la siguiente manera:

- Para calcular la remoción de la turbidez se utilizó la siguiente expresión:

$$\%R_T = \frac{(C_{T_0} - C_{T_f})}{C_{T_0}} \times 100\%. \quad (10)$$

Donde:  $\%R_T$ : es el porcentaje de remoción de la turbidez;  $C_{T_0}$ : es el valor de la turbidez inicial que presenta el ARS antes del tratamiento (NTU);  $C_{T_f}$ : es el valor de la turbidez final que presenta el ARS después del tratamiento (NTU).

- Para calcular la remoción del color se utilizó la siguiente expresión:

$$\%R_C = \frac{(C_{C_0} - C_{C_f})}{C_{C_0}} \times 100\%. \quad (11)$$

Donde:  $\%R_C$ : es el porcentaje de remoción del color;  $C_{C_0}$ : es el valor del color inicial que presenta el ARS antes del

tratamiento (UC);  $C_{C_f}$ : es el valor del color final que presenta el ARS después del tratamiento (UC).

- Para calcular la remoción de la DQO se utilizó la siguiente expresión:

$$\%R_{DQO} = \frac{(C_{DQO_0} - C_{DQO_f})}{C_{DQO_0}} \times 100\%. \quad (12)$$

Donde:  $\%R_{DQO}$ : es el porcentaje de remoción de la DQO;  $C_{DQO_0}$ : es el valor de la DQO inicial que presenta el ARS antes del tratamiento (mg/L);  $C_{DQO_f}$ : es el valor de la DQO final que presenta el ARS después del tratamiento (mg/L).

- Para calcular la remoción de los SST se utilizó la siguiente expresión:

$$\%R_{SST} = \frac{(C_{SST_0} - C_{SST_f})}{C_{SST_0}} \times 100\%. \quad (13)$$

Donde:  $\%R_{SST}$ : es el porcentaje de remoción de los SST;  $C_{SST_0}$ : es el valor de los SST iniciales que presenta el ARS antes del tratamiento (mg/L);  $C_{SST_f}$ : es el valor de los SST finales que presenta el ARS después del tratamiento (mg/L).

2.4) Adicionalmente se determinó la eficiencia anódica, para lo cual se calculó el peso real perdido -realizando el pesado de los ánodos utilizados en cada tratamiento antes y después de cada ensayo experimental-, y el peso teórico perdido -haciendo uso de la segunda ley de Faraday-. Todo lo antes descrito fue calculado de la siguiente manera:

- Para evaluar la eficiencia del ánodo se utilizó la siguiente expresión:

$$E_A = \frac{P_R}{P_T} \times 100\%. \quad (14)$$

Donde:  $E_A$ : es el valor de la eficiencia del ánodo;  $P_R$ : es el valor del peso real perdido por el ánodo (g);  $P_T$ : es el valor del peso teórico perdido por el ánodo de acuerdo con la segunda ley de Faraday (g).

El valor del peso real perdido por el ánodo, se calculó de la siguiente forma:

$$P_R = P_{R_0} - P_{R_f}. \quad (15)$$

Donde:  $P_R$ : es el valor del peso real perdido por el ánodo (g);  $P_{R_0}$ : es el peso del ánodo antes del tratamiento (g);  $P_{R_f}$ : es el peso del ánodo después del tratamiento (g).

Y, para el cálculo del valor del peso teórico perdido ( $P_T$ ) durante el ECG, hicimos uso de la segunda ley de Faraday:

$$P_T = \frac{I \cdot t \cdot M}{F \cdot \theta}. \quad (16)$$

Donde:  $P_T$ : es la masa desprendida (g);  $I$ : es la intensidad de corriente (A);  $t$ : es el tiempo (s);  $M$ : es el peso molecular ( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ );  $F$ : es la constante de Faraday ( $96\,485,3\text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$ );  $\theta$ : es el número de electrones implicados en la reacción.

2.5) También se determinó el consumo energético durante el ECG, a través del conocimiento del tiempo utilizado en cada corrida experimental, junto a los datos del voltaje y amperaje utilizados. Los valores del consumo energético, fueron calculados de la siguiente manera:

- Para calcular el consumo energético durante el ECG se hizo uso de la siguiente expresión:

$$E = I \times V \times t. \quad (17)$$

Donde:  $E$ : es la energía consumida (KWh);  $I$ : es la intensidad de corriente (A);  $V$ : es el voltaje (V);  $t$ : es el tiempo (h).

Adicionalmente se calculó el consumo energético específico, en el cual se consideró un volumen de agua tratada de 3 L.

- Para calcular el consumo energético específico durante el ECG se hizo uso de la siguiente expresión:

$$CE_E = \frac{E}{V_T}. \quad (18)$$

Donde:  $CE_E$ : es el consumo energético específico ( $\text{kWh}\cdot\text{m}^3$ );  $E$ : es la energía consumida (kWh);  $V_T$ : es el volumen de agua residual tratada.

En la Fig. 1 se muestra la CECG construida y lista para iniciar el tratamiento experimental.



Fig. 1 CECG utilizada en cada tratamiento experimental

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Determinación de los parámetros de operación

1) *Matriz de diseño y resultados del experimento*: Para determinar los parámetros de operación del ECG usando la

MSR, se utilizó el DCCR con tres factores y dos niveles ( $2^3$ ), a través del cual se determinó que el número de corridas experimentales necesarias a realizar en nuestra investigación serían 20, de las cuales 8 correspondieron a los puntos factoriales, 6 a los puntos centrales y las otras 6 a los puntos axiales.

En la Tabla 3, se resumen los porcentajes de remoción de la turbidez, color, DQO y SST obtenidos después de realizar el diseño de experimentos.

TABLA 3  
RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS AL APLICAR EL DCCR

N°	Variables			Respuestas			
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Grado de remoción			
				$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$	$Y_4$
1	5	20	12	20	21	23	33
2	15	20	12	71	79	75	84
3	5	30	12	50	46	36	40
4	15	30	12	76	77	71	74
5	5	20	18	25	28	45	51
6	15	20	18	98	98	96	96
7	5	30	18	51	56	58	73
8	15	30	18	97	97	96	95
9	1,591	25	15	10	15	20	28
10	18,409	25	15	93	94	95	92
11	10	16,591	15	46	50	61	63
12	10	33,409	15	74	76	71	72
13	10	25	9,955	58	59	45	51
14	10	25	20,045	79	84	85	87
15	10	25	15	70	70	70	71
16	10	25	15	69	72	69	70
17	10	25	15	71	71	70	71
18	10	25	15	73	73	69	72
19	10	25	15	72	71	69	74
20	10	25	15	71	72	70	73

De los resultados mostrados en la Tabla 3, podemos observar que los porcentajes de remoción de la turbidez varían entre el 10% y el 98%, para el color varían entre el 15% y el 98%, para la DQO varían entre el 20% y el 96%, y para los SST varían entre el 28% y el 96%. Estos valores de remoción obtenidos en las 20 corridas experimentales sirvieron para determinar las condiciones óptimas de operación a través de una evaluación de la superficie de respuesta del grado de remoción de la turbidez, color, DQO y SST.

2) *Evaluación de la superficie de respuesta del grado de remoción de la turbidez, color, DQO y SST*: Los resultados del experimento para las variables de respuesta analizadas (véase Tabla 3), se trataron a través de un análisis de varianza (ANOVA), a partir del cual, se pudo evaluar e identificar la

significancia del modelo polinomial propuesto y de los factores principales, interacciones y términos cuadráticos para cada variable de respuesta, lo que nos permitió, a partir de su análisis, poder ajustar cada modelo obtenido a través de una reducción del modelo completo eliminando los términos no significativos con un criterio jerárquico, y con ello, poder obtener el modelo cuadrático para las variables de respuesta  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  y  $Y_4$ .

A continuación, se muestran los valores del ANOVA de las respuestas de los modelos reducidos:

TABLE 4  
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA RESPUESTA  $Y_1$  DEL MODELO REDUCIDO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	8	10 977,5	1 372,19	566,11	0,000
Lineal	3	9 670,3	3 223,43	1 329,84	0,000
Tiempo	1	8 246,4	8 246,40	3 402,10	0,000
NaCl	1	839,7	839,75	346,44	0,000
Voltaje	1	584,1	584,15	240,99	0,000
Cuadrado	2	736,2	368,12	151,87	0,000
Tiempo*Tiempo	1	613,0	612,98	252,89	0,000
NaCl*NaCl	1	176,7	176,71	72,90	0,000
Interacción de 2 factores	3	571,0	190,33	78,52	0,000
Tiempo*NaCl	1	338,0	338,00	139,44	0,000
Tiempo*Voltaje	1	220,5	220,50	90,97	0,000
NaCl*Voltaje	1	12,5	12,50	5,16	0,044
Error	11	26,7	2,42	---	---
Falta de ajuste	6	16,7	2,78	1,39	0,368
Error puro	5	10,0	2,00	---	---
Total	19	11 004,2	---	---	---

TABLE 5  
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA RESPUESTA  $Y_2$  DEL MODELO REDUCIDO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	10515,2	1502,17	759,48	0,000
Lineal	3	9460,0	3153,35	1594,30	0,000
Tiempo	1	8112,9	8112,91	4101,81	0,000
NaCl	1	643,2	643,24	325,22	0,000
Voltaje	1	703,9	703,88	355,87	0,000
Cuadrado	2	602,7	301,34	152,35	0,000
Tiempo*Tiempo	1	517,0	517,00	261,39	0,000
NaCl*NaCl	1	127,1	127,07	64,24	0,000
Interacción de 2 factores	2	452,5	226,25	114,39	0,000
Tiempo*NaCl	1	392,0	392,00	198,19	0,000
Tiempo*Voltaje	1	60,5	60,50	30,59	0,000
Error	12	23,7	1,98	---	---
Falta de ajuste	7	18,2	2,60	2,37	0,180
Error puro	5	5,5	1,10	---	---
Total	19	10539,0	---	---	---

TABLE 6  
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA RESPUESTA  $Y_3$  DEL MODELO REDUCIDO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	9002,36	1286,05	1968,30	0,000
Lineal	3	8605,68	2868,56	4390,32	0,000
Tiempo	1	6684,21	6684,21	10230,16	0,000
NaCl	1	110,34	110,34	168,87	0,000
Voltaje	1	1811,13	1811,13	2771,94	0,000
Cuadrado	3	284,18	94,73	144,98	0,000
Tiempo*Tiempo	1	257,57	257,57	394,21	0,000
NaCl*NaCl	1	21,54	21,54	32,96	0,000
Voltaje*Voltaje	1	35,79	35,79	54,78	0,000
Interacción de 2 factores	1	112,50	112,50	172,18	0,000
Tiempo*NaCl	1	112,50	112,50	172,18	0,000
Error	12	7,84	0,65	---	---
Falta de ajuste	7	6,34	0,91	3,02	0,121
Error puro	5	1,50	0,30	---	---
Total	19	9010,20	---	---	---

TABLE 7  
ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA RESPUESTA  $Y_4$  DEL MODELO REDUCIDO

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	7029,69	1004,24	203,19	0,000
Lineal	3	6546,26	2182,09	441,51	0,000
Tiempo	1	4936,00	4936,00	998,72	0,000
NaCl	1	80,40	80,40	16,27	0,002
Voltaje	1	1529,86	1529,86	309,54	0,000
Cuadrado	1	170,93	170,93	34,59	0,000
Tiempo*Tiempo	1	170,93	170,93	34,59	0,000
Interacción de 2 factores	3	312,50	104,17	21,08	0,000
Tiempo*NaCl	1	200,00	200,00	40,47	0,000
Tiempo*Voltaje	1	40,50	40,50	8,19	0,014
NaCl*Voltaje	1	72,00	72,00	14,57	0,002
Error	12	59,31	4,94	---	---
Falta de ajuste	7	48,47	6,92	3,20	0,110
Error puro	5	10,83	2,17	---	---
Total	19	7089,00	---	---	---

Al analizar los datos del ANOVA de las respuestas  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  y  $Y_4$  de los modelos reducidos, reportados en las Tablas 4, 5, 6 y 7, se concluyó que:

- El ANOVA del modelo cuadrático reducido para la respuesta  $Y_1$  (véase Tabla 4), indica que los factores: tiempo ( $x_1$ ), NaCl ( $x_2$ ) y Voltaje ( $x_3$ ), fueron significativos ( $p < 0,05$ ). De otro lado, para los términos cuadráticos, tanto el término tiempo-tiempo ( $x_1^2$ ) como el término NaCl-NaCl ( $x_2^2$ ), tuvieron un efecto significativo. Con respecto a las interacciones tiempo-NaCl ( $x_1*x_2$ ) y tiempo-voltaje ( $x_1*x_3$ ), ambas resultaron significativas, mientras que con la



interacción NaCl-voltaje ( $x_2 \times x_3$ ) también tuvo un efecto significativo, pero con un valor cercano a 0.05.

- El ANOVA del modelo cuadrático reducido para la respuesta  $Y_2$  (véase Tabla 5), indica que los factores: tiempo ( $x_1$ ), NaCl ( $x_2$ ) y Voltaje ( $x_3$ ), fueron significativos ( $p < 0.05$ ). De otro lado, para los términos cuadráticos, tanto el término tiempo-tiempo ( $x_1^2$ ) como el término NaCl-NaCl ( $x_2^2$ ), tuvieron un efecto significativo. Con respecto a las interacciones tiempo-NaCl ( $x_1 \times x_2$ ) y tiempo-voltaje ( $x_1 \times x_3$ ), ambas resultaron significativas.
- El ANOVA del modelo cuadrático reducido para la respuesta  $Y_3$  (véase Tabla 6), indica que los factores: tiempo ( $x_1$ ), NaCl ( $x_2$ ) y Voltaje ( $x_3$ ), fueron significativos ( $p < 0.05$ ). De otro lado, para los términos cuadráticos, el término tiempo-tiempo ( $x_1^2$ ), el término NaCl-NaCl ( $x_2^2$ ), y el término Voltaje-Voltaje ( $x_3^2$ ), tuvieron un efecto significativo. Con respecto a las interacciones, el término tiempo-NaCl ( $x_1 \times x_2$ ) resultó significativo.
- El ANOVA del modelo cuadrático reducido para la respuesta  $Y_4$  (véase Tabla 7), indica que los factores: tiempo ( $x_1$ ), NaCl ( $x_2$ ) y Voltaje ( $x_3$ ), fueron significativos ( $p < 0.05$ ). De otro lado, para los términos cuadráticos, el término tiempo-tiempo ( $x_1^2$ ), tuvo un efecto significativo. Con respecto a las interacciones, los términos tiempo-NaCl ( $x_1 \times x_2$ ), tiempo-voltaje ( $x_1 \times x_3$ ) y NaCl-voltaje ( $x_2 \times x_3$ ), resultaron significativos.

De las Tablas 4, 5, 6 y 7, también se puede observar que, la suma de cuadrados del error puro para cada variable de respuesta analizada es pequeña con respecto a la suma de cuadrados del total, indicando ello una buena reproducibilidad en el punto central [22].

Por otro lado, la falta de ajuste de los cuatro modelos analizados es no significativa, ya que el valor  $p > 0.05$ , lo cual nos indica que los modelos reducidos para cada variable de respuesta no detectan ninguna falta de ajuste y con ello se concluye que los modelos obtenidos son adecuados desde el punto de vista estadístico.

2) *Modelos cuadráticos obtenidos para las variables de respuesta  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  y  $Y_4$ :* Una vez determinado que todos los efectos e interacciones son significativos sobre las variables de respuesta evaluadas, a partir del análisis de diseño de superficie de respuesta realizado con Minitab se determinó que las ecuaciones de regresión cuadrática en unidades codificadas para cada respuesta analizada fueron las siguientes:

$$Y_1 = -207,4 + (11,356 \times \text{Tiempo}) + (12,39 \times \text{NaCl}) + (0,763 \times \text{Voltaje}) - (0,2596 \times \text{Tiempo} \times \text{Tiempo}) - (0,1394 \times \text{NaCl} \times \text{NaCl}) - (0,2600 \times \text{Tiempo} \times \text{NaCl}) + (0,3500 \times \text{Tiempo} \times \text{Voltaje}) - (0,0833 \times \text{NaCl} \times \text{Voltaje}). \quad (19)$$

$$Y_2 = -187,6 + (13,893 \times \text{Tiempo}) + (10,082 \times \text{NaCl}) + (0,560 \times \text{Voltaje}) - (0,2384 \times \text{Tiempo} \times \text{Tiempo}) -$$

$$(0,1182 \times \text{NaCl} \times \text{NaCl}) - (0,2800 \times \text{Tiempo} \times \text{NaCl}) + (0,1833 \times \text{Tiempo} \times \text{Voltaje}). \quad (20)$$

$$Y_3 = -170,91 + (11,557 \times \text{Tiempo}) + (4,513 \times \text{NaCl}) + (9,092 \times \text{Voltaje}) - (0,16911 \times \text{Tiempo} \times \text{Tiempo}) - (0,04890 \times \text{NaCl} \times \text{NaCl}) - (0,1751 \times \text{Voltaje} \times \text{Voltaje}) - (0,1500 \times \text{Tiempo} \times \text{NaCl}). \quad (21)$$

$$Y_4 = -43,4 + (13,78 \times \text{Tiempo}) - (0,515 \times \text{NaCl}) + (0,03 \times \text{Voltaje}) - (0,1365 \times \text{Tiempo} \times \text{Tiempo}) - (0,2000 \times \text{Tiempo} \times \text{NaCl}) - (0,1500 \times \text{Tiempo} \times \text{Voltaje}) + (0,2000 \times \text{NaCl} \times \text{Voltaje}). \quad (22)$$

3) *Resumen de los modelos cuadráticos generados:* La Tabla 8, muestran los valores de  $R^2$ ,  $R^2_{\text{ajustado}}$  y  $R^2_{\text{pred}}$ , de los modelos cuadráticos generados para las respuestas  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  y  $Y_4$ , que fueron obtenidos a partir del análisis de diseño de superficie de respuesta realizado con Minitab.

TABLA 8  
RESUMEN DEL MODELO CUADRÁTICO GENERADO PARA  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  Y  $Y_4$

Variable de respuesta	S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
$Y_1$	1,55689	99,76%	99,58%	99,25%
$Y_2$	1,40637	99,77%	99,64%	99,04%
$Y_3$	0,80832	99,91%	99,86%	99,72%
$Y_4$	2,22314	99,16%	99,68%	97,49%

Tomando en cuenta los valores mostrados en la tabla resumen de los modelos cuadráticos generados, se observó que:

- Al ser los valores del  $R^2$  y  $R^2_{\text{ajustado}}$  muy próximos ( $R^2 = 0,9976$  y  $R^2_{\text{ajustado}} = 0,9958$  para  $Y_1$ ;  $R^2 = 0,9977$  y  $R^2_{\text{ajustado}} = 0,9964$  para  $Y_2$ ;  $R^2 = 0,9991$  y  $R^2_{\text{ajustado}} = 0,9986$  para  $Y_3$ ; y  $R^2 = 0,9916$  y  $R^2_{\text{ajustado}} = 0,9968$  para  $Y_4$ ), existe un alto grado de correlación entre los valores experimentales y estimados, debido a la cercanía de ambos valores [22].
- Como los valores del  $R^2$  y el  $R^2_{\text{ajustado}}$  obtenidos en todos los casos son muy cercanos, se puede afirmar que no hay términos no significativos en los cuatro modelos analizados, y que cada modelo obtenido es adecuado desde el punto de vista estadístico.
- En todos los modelos, al ser los coeficientes de determinación obtenidos ( $R^2$ ) cercanos al 100%, se pudo establecer que los porcentajes de la variabilidad de los resultados son explicados a través de los modelos cuadráticos obtenidos.

4) *Optimización de respuestas:* Con los modelos cuadráticos generados para  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  y  $Y_4$ , y haciendo uso del optimizador de respuesta de Minitab, se identificó los valores de los parámetros óptimos (véase Tabla 9) y los porcentajes de remoción predichos por el *software* (véase Fig. 2).



TABLA 9  
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUAS RESIDUALES TEXTILES POR EC

Variable	Parámetros óptimos de operación
Tiempo ( $x_1$ )	16,5
NaCl ( $x_2$ )	29,8
Voltaje ( $x_3$ )	18,0

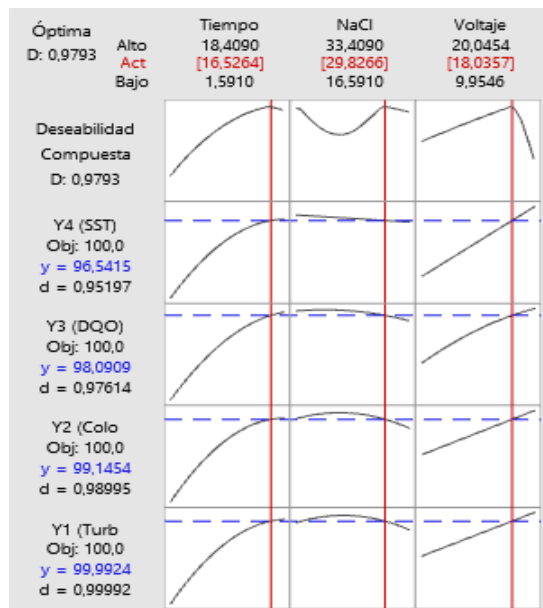


Fig. 2 Diagrama de los efectos principales para el porcentaje de remoción de la turbidez, color, DQO y SST.

De la Tabla 9, se observa que las condiciones óptimas obtenidas correspondieron a un tiempo de 16,5 minutos, una concentración de NaCl de 29,8 g/L y un voltaje de 18 V.

De la Fig. 2, podemos observar que las condiciones óptimas de remoción de la turbidez, color, DQO y SST fueron estimadas por el método de deseabilidad, utilizando Minitab, logrando observar que el valor de la deseabilidad compuesta para  $Y_1$  es de 0,9999, para  $Y_2$  es de 0,9915, para  $Y_3$  es de 0,9809, y para  $Y_4$  es de 0,9654, los cuales se acercan mucho al valor máximo que es el valor 1.

### B. Determinación del porcentaje de remoción de la turbidez, color, DQO y SST

Para validar el modelo matemático obtenido, se verificó los valores reportados en la Fig. 2, realizando cuatro corridas experimentales adicionales teniendo en cuenta los parámetros óptimos de operación reportados en la Tabla 9.

TABLA 10  
PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

Muestra	Grado de remoción (%)			
	Turbidez	Color	DQO	SST
M1	97	99	97	96
M2	99	99	98	96
M3	99	100	98	97
M4	98	99	97	96

De la Tabla 10, podemos observar que después de realizar las cuatro corridas experimentales adicionales, considerando los parámetros óptimos de operación, los porcentajes de remoción obtenidos presentaron valores entre el 97-99%, 99-100%, 97-98% y el 96 y 97%, para la turbidez, color, DQO y SST, respectivamente.

Estos valores de remoción obtenidos para la turbidez, color, DQO y SST, están dentro del rango de los valores predichos por Minitab, ya que de acuerdo a lo reportado en la Tabla 9, los valores de deseabilidad compuesta para  $Y_1$ ,  $Y_2$ ,  $Y_3$  y  $Y_4$ , con similares a los valores experimentales obtenidos con las cuatro corridas experimentales adicionales, lo cual nos demuestra que los modelos matemáticos obtenidos junto a las condiciones de operación óptimas utilizadas, son las adecuadas para lograr buenos rendimientos en la remoción de estos cuatro tipos de contaminantes de los efluentes de la industria textil.

Además, los porcentajes de remoción de color y turbidez obtenidos (entre el 99 y el 100% para la remoción del color y entre el 97 y 99% para la remoción de la turbidez), concuerdan con los valores reportados por [23], quienes reportaron valores de remoción del 96% del color aparente y del 99% de la turbidez. En cuanto a la remoción de los SST, en el presente trabajo se obtuvieron valores entre el 96 y 97%, mientras que [23], reportaron que en su investigación no se lograron eliminar en su totalidad las partículas suspendidas.

Por otro lado, [24] reportaron una reducción del 80,85% en la DQO, valor inferior al obtenido en nuestra investigación, el cual se encuentra por encima del 97%; además, reportaron una reducción del 100% en la intensidad del color, el cual es un valor similar a los porcentajes de remoción del color obtenidos en nuestra investigación.

### C. Determinación de la eficiencia del ánodo

Para determinar la eficiencia, se pesaron los ánodos utilizados antes y después del tratamiento experimental, y en función de su peso promedio, se procedió a calcular la pérdida de peso en cada una de las cuatro corridas experimentales.

Una vez determinadas las pérdidas de peso real del ánodo utilizado, se procedió a calcular el peso teórico perdido durante el ECG haciendo uso de la segunda Ley de Faraday, obteniendo como resultado un peso teórico perdido de 0,3693 g.

Conocidas las pérdidas de peso real y teórico, se calculó la eficiencia del ánodo utilizado. En la Tabla 11 se resume la eficiencia de los ánodos utilizados en el ECG.

TABLA 11  
EFICIENCIA DEL ÁNODO UTILIZADO EN EL ECG

Muestra	Peso inicial	Peso final	Pérdida de peso real (g)	Pérdida de peso teórico (g)	Eficiencia del ánodo (%)
M <sub>1</sub>	78,2739	77,9328	0,3411	0,3693	92
M <sub>2</sub>	77,9538	77,6183	0,3355	0,3693	91
M <sub>3</sub>	77,6238	77,2808	0,3430	0,3693	93
M <sub>4</sub>	77,3031	76,9633	0,3398	0,3693	92

De la Tabla 11, podemos observar que después de realizar las cuatro corridas experimentales adicionales, considerando las condiciones óptimas de operación y utilizando ánodos de aluminio, los porcentajes de eficiencia del ánodo obtenidos presentaron valores entre el 91% y el 93%.

Estos valores de eficiencia obtenidos para los ánodos de aluminio, concuerdan con lo afirmado por [13] [14]. Además, [25], reportó que, usando electrodos de aluminio, se obtuvo un porcentaje de remoción de la turbidez con valores entre el 82,94 y el 85,66%, y porcentajes de remoción de la DQO entre el 72,20 y el 75,38%, para efluentes de la industria láctea, lo que nos demuestra que los electrodos de aluminio son una excelente alternativa tanto para las aguas residuales de la industria textil como para las aguas residuales de la industria láctea.

Por otro lado, tomando como referencia los resultados obtenidos en la presente investigación, lo mencionado por [13] [14], y los resultados reportados por [25], podemos afirmar que los ánodos de aluminio pueden ser una excelente opción para los tratamientos de aguas residuales de distintos tipos de industrias cuando se quiera tratarlas mediante procesos de electrocoagulación, debido a su alta eficiencia en los tratamientos antes referidos.

#### D. Evaluación del consumo energético

Para calcular el consumo energético durante el ECG, se tuvieron en cuenta los valores del voltaje, intensidad de corriente y tiempo de tratamiento utilizados; y para determinar el consumo específico se consideró el volumen de agua residual utilizada en cada corrida experimental.

TABLA 12  
CONSUMO ENERGÉTICO DURANTE EL ECG

Parámetros	Unidad	Valores
Voltaje	(V)	18,0
Intensidad de corriente	(A)	4,0
Tiempo	(min)	16,5
Consumo energético	(KWh)	0,02
Consumo energético específico	(KWh/m <sup>3</sup> )	6,6*

\* Consumo energético específico para un volumen de AR de 3 L.

Como podemos ver en la Tabla 12, el consumo energético y el consumo energético específico requerido para el tratamiento de un volumen de muestra de agua residual de 3 L, es de 0,02 kWh y 6,6 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente, considerando un voltaje de 18,0 V, una intensidad de corriente de 4,0 A y un tiempo de tratamiento de 16,5 minutos.

El valor del consumo energético específico obtenido en la presente investigación no concuerda con los datos reportados por [24], quienes reportaron un consumo energético de 15,96 kWh/m<sup>3</sup>, valor que es muy superior al valor obtenido de 6,6 kWh/m<sup>3</sup>. En este sentido, se podría decir que, si bien se tiene un consumo energético mucho menor (6,6 kWh/m<sup>3</sup>), los resultados obtenidos demuestran que se lograron porcentajes de remoción de la DQO entre el 97 y 98%, y porcentajes de remoción del color entre el 99 y 100%; mientras que en la

investigación de [24], se reportaron valores de remoción de la DQO de un 80,85%, y una reducción del 100% en la intensidad del color, lo cual nos demuestra que la eficiencia de nuestro tratamiento de EC logró mejores resultados con un consumo energético específico menor.

Además, el valor del consumo energético específico obtenido en la presente investigación tampoco concuerda con los datos reportados por [26], quien reportó un consumo energético de 1 kWh/m<sup>3</sup>, valor muy inferior al valor obtenido de 6,6 kWh/m<sup>3</sup>. En este sentido, se podría decir que, si bien se tiene un consumo energético mucho mayor (6,6 kWh/m<sup>3</sup>), los resultados obtenidos demuestran que se lograron porcentajes de remoción de la DQO entre el 97 y 98%; mientras que en la investigación de [26], se reportaron valores de remoción de la DQO de un 87%, lo cual nos demuestra que la eficiencia de nuestro tratamiento de EC logró mejores resultados a pesar de tener un mayor consumo energético.

#### IV. CONCLUSIONES

La CECG diseñada, demostró que el proceso EQ de ECG es una alternativa confiable para la remoción de la turbidez, color, DQO y SST en aguas residuales provenientes de la industria textil, operando bajo un sistema tipo *batch* para un volumen de operación de 3L, con electrodos de Al conectados con una configuración monopolar en paralelo y, considerando un tiempo de tratamiento de 16,5 minutos, una concentración de cloruros de 29,8 g/L y una tensión de 18 V.

Las principales conclusiones sobre la determinación de los porcentajes de remoción de la turbidez, color, DQO y SST, durante el ECG utilizando los parámetros óptimos de operación, son las siguientes:

- Después de realizar las cuatro corridas experimentales adicionales, considerando un tiempo de 16,5 minutos, una concentración de NaCl de 29,8 g/L y un voltaje de 18 V, los porcentajes de remoción obtenidos presentaron valores entre el 97-99%, 99-100%, 97-98% y el 96 y 97%, para la turbidez, color, DQO y SST, respectivamente.
- Los valores de remoción obtenidos para la turbidez, color, DQO y SST de las aguas residuales de la industria textil, están dentro del rango de los valores predichos por Minitab, el cual reportó un porcentaje de remoción de la turbidez del 99,99%, un porcentaje de remoción del color del 99,15%, un porcentaje de remoción de la DQO del 98,09%, y un porcentaje de remoción de los SST del 96,54%, lo cual nos demuestra que los modelos matemáticos obtenidos junto a las condiciones de operación óptimas utilizadas, son las adecuadas para lograr buenos rendimientos en la remoción de estos cuatro tipo de contaminantes de las aguas residuales de la industria textil.

Las principales conclusiones sobre la determinación de la eficiencia del ánodo utilizado son las siguientes:

- Después de realizar las cuatro corridas experimentales adicionales, considerando un tiempo de 16,5 minutos, una concentración de NaCl de 29,8 g/L, un voltaje de 18 V, y utilizando ánodos de aluminio, los porcentajes de eficiencia del ánodo obtenidos presentaron valores entre el 91% y el 93%.
- De los porcentajes de eficiencia obtenido, podemos decir que los ánodos de aluminio son una excelente alternativa para el tratamiento de las aguas residuales de la industria textil mediante procesos de electrocoagulación.

La principal conclusión sobre la evaluación del consumo energético es la siguiente:

- Después de realizar las cuatro corridas experimentales adicionales, el consumo energético y el consumo energético específico requerido para el tratamiento de un volumen de muestra de agua residual de 3 L, es de 0,02 kWh y 6,6 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente, considerando siempre un voltaje de 18,0 V, una intensidad de corriente de 4,0 A y un tiempo de tratamiento de 16,5 minutos.

#### AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Laboratorio de Química de Sistemas Heterogéneos (LaQuiSiHe) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (FIUBA), por brindarnos el uso del equipamiento y las instalaciones para el desarrollo de la presente investigación.

#### REFERENCIAS

[1] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO), *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. Paris, 2019.

[2] A. S. Naje, S. Chelliapan, Z. Zakaria, M. A. Ajeel & P. A. Alaba, "A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater", *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 3, núm. 33, pp. 263-292, 2017.

[3] M. Bermeo, "Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción", Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2017.

[4] N. V. Lasso Erazo, "Contraste de metodologías usando un coagulante natural (moringa) y tratamiento electroquímico aplicado a aguas contaminadas con colorantes textiles", Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química, 2020.

[5] R. N. León Córdor y K. D. Naupari Leiva, "Remoción de la demanda química de oxígeno en agua sintética de textilera utilizando el chayote (*Sechium Edule*) a nivel laboratorio", Tesis de Grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.

[6] J. Cole, "El teñido de tejidos: el mayor problema de contaminación de la industria de la moda", jun. 05, 2019. [https://www.vogue.es/moda/articulos/tintes-toxicos-ropa-problemas-contaminacion-industria-moda#:~:text=Casi tres cuartas partes del,el color a nuestra ropa \(consultado sep. 12, 2022\)](https://www.vogue.es/moda/articulos/tintes-toxicos-ropa-problemas-contaminacion-industria-moda#:~:text=Casi tres cuartas partes del,el color a nuestra ropa (consultado sep. 12, 2022)).

[7] F. S. Calderon Rodriguez y S. D. Olortico Soto, "Proceso foto - fenton para la degradación de color del efluente de la industria textil", Tesis de Grado, Universidad Nacional del Centro del Perú, 2019.

[8] V. Buscio Olivera, "Tratamiento y reutilización de efluentes de la industria textil mediante técnicas de membranas", Tesis de Doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.

[9] C. Banchón, R. Baquerizo, D. Muñoz, y L. Zambrano, "Coagulación natural para la descontaminación de efluentes industriales", *Enfoque UTE*, vol. 7, núm. 4, pp. 111-126, dic. 2016, doi: 10.29019/ENFOQUEUTE.V7N4.118

[10] A. Cortazar-Martínez, C. A. González-Ramírez, C. Coronel-Olivares, J. A. Escalante-Lozada, J. Castro-Rosas, y J. R. Villagómez-Ibarra, "Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil", *Univ. y Cienc.*, vol. 28, núm. 2, pp. 187-199, 2012. [En línea]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-29792012000200009](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000200009)

[11] M. del M. Rosales Soro, "Procesos de biodecoloración de efluentes coloreados simulados y reales", Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán, 2018.

[12] S. M. Imtiaz Uddin, "Impact of textile wastewater pollution on the environment", *Pakistan Text. J.*, pp. 38-39, 2018. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/329175203\\_Impact\\_of\\_Textile\\_Wastewater\\_Pollution\\_on\\_the\\_Environment](https://www.researchgate.net/publication/329175203_Impact_of_Textile_Wastewater_Pollution_on_the_Environment)

[13] C. E. Barrera-Díaz, *Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales*. REVERTÉ EDICIONES, S. A. DE C. V., 2014.

[14] A. P. Restrepo Mejía, Á. Arango Ruiz, y L. F. Garcés Giraldo, "Biblioteca Digital Lasallista: La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas", *Prod. + Limpia*, vol. 1, núm. 2, pp. 58-77, 2006. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/277035194\\_La\\_Electrocoagulation\\_retos\\_y\\_oportunidades\\_en\\_el\\_tratamiento\\_de\\_aguas](https://www.researchgate.net/publication/277035194_La_Electrocoagulation_retos_y_oportunidades_en_el_tratamiento_de_aguas)

[15] A. Ungria Castillo, "Aplicación de procesos electroquímicos en tratamientos terciarios de aguas de salida de depuradora para la eliminación de contaminantes emergentes y microbiológicos", Trabajo de Fin de Máster, Universidad de Zaragoza, 2018.

[16] K. K. Quispe Quispe, "Electrocoagulación en la remoción de mercurio de las aguas residuales en el centro poblado la Rinconada Puno", Tesis de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, 2015.

[17] Consolider Tragua, *Tecnologías de tratamiento de aguas para su reutilización*. 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/tecnologias-de-tratamiento-de-aguas-para-su-reutilizacion>

[18] M. J. Lavorante, H. Álvarez, C. Chantrill, y H. Fasoli, "Aplicaciones Ambientales de la Electrocoagulación a Escala de Planta Piloto", *Ciencia*, vol. 6, núm. 21, pp. 39-47, 2011.

[19] G. A. Peluffo Foliaco y S. Castro Muñoz, "Evaluación de la capacidad de adsorción del colorante azul marino directo (AMD) en solución acuosa con carbón obtenido de cáscaras de bananas", Trabajo de Grado, Universidad de la Costa, 2019.

[20] Minitab, "Resumen de diseños centrales compuestos - Minitab". <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/doe/supporting-topics/response-surface-designs/summary-of-central-composite-designs/> (consultado sep. 22, 2022).

[21] P. Gutiérrez y R. De la Vara, *Análisis y diseño de experimentos*, 3a ed. México: Mc Graw Hill Education, 2012.

[22] R. M. Mendoza Sandoval, "Hidrólisis química y enzimática de un extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) para la obtención de fructosa", Tesis de grado, Universidad Agraria La Molina, 2017.

[23] M. Meza Catalán y M. A. García Morales, "Tratamiento de agua residual industrial textil mediante el proceso de filtración lenta", *Tlamati Sabiduría*, vol. 7, núm. 2, 2016.

[24] N. Henao Ospina y S. Ramírez Betancur, "Tratamiento de aguas residuales del sector textil mediante proceso acoplado electrocoagulación-electro-oxidación", Trabajo de Grado, Universidad EAFIT, 2016.

[25] S. E. Morales Quevedo, "Remoción de aceites y grasas de un efluente industrial del sector lácteo por electrocoagulación con electrodos de aluminio", Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2018.

[26] E. A. Aguilar Ascon, "Evaluación de la eficiencia de una celda de electrocoagulación a escala laboratorio para el tratamiento de agua", Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2015.