

Artículo

Aspectos termodinámicos y cinéticos del proceso de electrocoagulación para la recuperación de partículas finas de carbón activado con oro

Rodrigo Martínez-Peñuñuri^{1,*}, J. R. Parga-Torres¹, J. L. Valenzuela-García², Alejandro Monserrat García-Alegría³, Gregorio González-Zamarripa⁴

¹ Departamento de Materiales and Metalurgia, Instituto Tecnológico de Saltillo, Tecnológico Nacional de México, 25280, Saltillo, Coahuila, México.

² Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia, Universidad de Sonora, 83000, Hermosillo, Sonora, México.

³ Departamento de Ciencias Químico Biológicas, Universidad de Sonora, 83000, Hermosillo, Sonora, México.

⁴ Departamento de Materiales, Instituto Tecnológico de Monclova, Tecnológico Nacional de México, 95245, Monclova, Coahuila, México.

* Autor de correspondencia: R.M.P. Departamento de Materiales and Metalurgia, Instituto Tecnológico de Saltillo, Tecnológico Nacional de México, 25280, Saltillo, Coahuila, México. Tel.: +52 (662) 430 1592. E-mail: rmartinez@metalurgicos.com.mx

Resumen

La eficiencia de los procesos metalúrgicos para la recuperación de oro cobra cada vez más relevancia, ante las bajas concentraciones de este metal en los cuerpos minerales y la dificultad de su extracción debido a su mineralogía. Los procesos de adsorción con carbón activado (CA) en la industria minero-metalúrgica, incluyen etapas donde este tiende a desgastarse y quebrarse, lo que representa una pérdida de CA en sí misma, pero también resulta en la pérdida de los valores del metal precioso, en las plantas de adsorción, desorción y reactivación (ADR) de CA. La tecnología de electrocoagulación (EC) se muestra como opción para aumentar la eficiencia de recuperación de partículas extremadamente finas de CA sin el uso de reactivos químicos. Para encontrar los parámetros óptimos, se han realizado pruebas de EC, escala laboratorio, tipo batch, en partículas de CA de 0.106 mm y 0.053 mm, utilizando electrodos de hierro y aluminio, como acercamiento a los parámetros óptimos de trabajo. Para el análisis del proceso de EC se utilizó el método estadístico Taguchi. La experimentación se realizó en medio acuoso sintético con concentración de partículas de CA 0.80 g/L. Este trabajo busca determinar los parámetros cinéticos y termodinámicos asociados a la EC de oro en CA. Finalmente, la EC muestra naturaleza espontánea, comportamiento de quimisorción, naturaleza endotérmica y aumento de la aleatoriedad del proceso, con recuperaciones superiores al 96% y 88% con electrodo de aluminio (Al) y hierro (Fe), respectivamente.

Abstract

The high efficiency of gold recovery via the industrial metallurgical process is increasingly relevant because gold is present at low concentrations in mineral bodies and is difficult to extract. In the mining–metallurgical industry, gold

Cita: Martínez-Peñuñuri *et al.* Aspectos termodinámicos y cinéticos del proceso de electrocoagulación para la recuperación de partículas finas de carbón activado con oro. *Ciencia y Tecnología ITESCAM Calkiní* 2023;2(3):13-32.

Recibido: 20 de septiembre de 2023

Aceptado: 30 de octubre de 2023

Publicado: 30 de diciembre de 2023

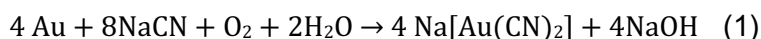
Copyright: Los datos proporcionados son propiedad de la revista *Ciencia y Tecnología ITESCAM Calkiní*.

adsorption on activated carbon (AC) includes steps where it tends to wear and break, representing a loss of AC itself but also resulting in the loss of precious metals in adsorption, desorption, and reactivation (ADR) plants. Electrocoagulation (EC) technology is an option to improve AC particles recovery, thus increasing the recovery efficiency of ultra-fine particles of AC without requiring additional chemicals. To find the optimal working parameters of gold recovery by EC, the present study conducts laboratory-scale, batch-type EC experiments on AC particles of different sizes (0.106 and 0.053 mm) using different electrodes (iron and aluminum). The experimental design and results were carried out using the Taguchi statistical method. The EC process was performed in a synthetic aqueous medium with an AC particle concentration of 0.8000 g/L. This work seeks to study the kinetic and thermodynamic parameters associated with the EC of gold in AC. Finally, the EC shows spontaneous nature, chemisorption behavior, endothermic nature, and increased randomness of the process, with recoveries greater than 96% and 88% with aluminum (Al) and iron (Fe) electrodes, respectively.

Palabras clave: electrocoagulación, carbón activado, carbón en columnas, adsorción, lixiviación en terreros, plantas ADR, remoción de partículas finas.

1. Introducción

El proceso típico de extracción de oro tiene múltiples etapas: proceso de trituración de mineral (trituración y molienda), lixiviación, adsorción en CA, desorción del CA, electro-deposición o precipitación con polvo de zinc, y refinación de oro. La lixiviación se logra típicamente con una solución de cianuro de sodio con fórmula química NaCN; el ion de CN reacciona con el elemento oro para la formación del complejo de aurocianuro, como se observa en la siguiente ecuación.



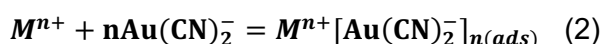
El complejo de aurocianuro permanece disuelto en la solución; posteriormente, procede a la etapa de adsorción en CA, donde se adsorbe y concentra. El oro cargado se extrae del CA mediante un proceso de despojo, y se recupera como metal mediante electrólisis. Una vez que finaliza el despojo, el CA pasa a un proceso de reactivación que regenera sus capacidades de adsorción, y se reutiliza en el proceso (1,2).

El mecanismo de adsorción en carbón de metales preciosos a partir de soluciones de cianuro tiene las siguientes características principales:

- La extracción se mejora en presencia de electrolitos como CaCl₂ y KCl
- La carga al equilibrio y la velocidad de adsorción aumentan con la disminución del pH
- La adsorción de oro aumenta el pH de la solución
- Los complejos neutros de cianuro como Hg(CN)₂ se adsorben fuertemente, independientemente de la fuerza iónica de la solución

- La adsorción es un proceso reversible, con una tasa de despojo más alta para condiciones ligeramente diferentes
- Existen evidencias de que la adsorción depende del potencial de reducción del sistema
- Para la mayoría de las condiciones, la relación molar de oro cargado a nitrógeno es de 0.5, lo que es consistente con la presencia del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2$
- La adsorción disminuye conforme la temperatura aumenta

El mecanismo de adsorción puede representarse por la siguiente ecuación:



La generación de partículas finas de CA y su posterior pérdida se debe a una combinación de los siguientes mecanismos, problemática a nivel mundial: desgaste de carbón sólido en el sistema de contacto de fases (carbón en proceso de pulpa y carbón en proceso de lixiviación), desgaste de carbón - carbón en sistemas de solución y suspensión (proceso de carbón en solución, proceso de carbón en pulpa y proceso de lixiviación, lavado con ácido); desgaste de carbón - carbón, carbón - acero en sistemas secos (durante la reactivación térmica, transferencia en contenedores, entre otros); rotura de carbón durante la transferencia (en bombas, eductores y en cribas); rotura por choque térmico durante la reactivación térmica y enfriamiento, y choque químico durante la eliminación de compuestos inorgánicos de carbón; lo que representa en sí mismo pérdida de CA, pero también pérdida de valores de oro cargado en dichas partículas finas (3).

Para optimizar la recuperación de oro en los procesos de ADR de las unidades mineras que trabajan por cianuración de terreros de mineral, no solo es importante asegurar la correcta operación y la estabilidad de los parámetros principales, sino que se vuelve relevante, evitar las pérdidas de las partículas extremadamente finas de CA, cuya capacidad de carga de oro aumenta con respecto a la reducción de su tamaño. Los procesos actualmente operan con un consumo promedio de 40 g/t de CA, con pérdidas por escape de partículas finas de hasta 41% del promedio de consumo, debido a la incapacidad actual de su recuperación por los métodos usados en la industria, que básicamente se trata del uso de mallas o cribas (3,4).

Por lo anterior, se presenta a la electrocoagulación como una técnica prometedora para solucionar la pérdida de las partículas finas de CA, ya que consiste en inducir corriente eléctrica en el agua o solución a tratar a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, dentro de los más comúnmente utilizados, están el hierro y el aluminio, son los más preferidos ya que son de bajo precio, de fácil acceso por que es material reciclado y efectivos en la eliminación de contaminantes. La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca las reacciones químicas que desestabilizan las formas en las que los materiales se encuentran presentes, bien sea suspendidas o disueltas. Es así que los materiales presentes en el medio acuoso forman

agregados, produciendo partículas sólidas que son menos coloidales y menos solubles que en estado de equilibrio. Cuando esto ocurre, las partículas forman componentes hidrofóbicos que se precipitan y/o flotan y se pueden remover fácilmente por algún método de separación de tipo secundario (5).

La coagulación entre partículas de diferente tamaño dentro de una suspensión con diversidad de tamaños de partículas ocurre más rápidamente que entre partículas del mismo tamaño, ya que la tendencia es que las partículas muy pequeñas se adhieran a las más grandes. Por el contrario, la coagulación entre partículas del mismo tamaño conduce gradualmente a una diversidad de tamaños de partículas, ya que algunas aumentan de tamaño en relación con otras.

Bajo los principios descritos en los párrafos anteriores, la EC en su desarrollo operativo, muestra características factibles para la resolución del problema planteado, donde el material fino a distintos tamaños de partícula generados comúnmente en los procesos metalúrgicos con uso de CA, son candidatos para su recuperación mediante este sistema propuesto, lo cual supone una innovación en el campo de la metalurgia extractiva de oro, con la finalidad de optimizar los procesos en las plantas ADR.

En este momento, el proceso electroquímico propuesto de EC no tiene referencia inmediata para la recuperación de partículas finas de carbón activado cargadas con oro, por lo que se presenta como una tecnología innovativa en el sector metalúrgico y con potencial relevancia en la búsqueda de la optimización operacional de los procesos para recuperación de oro con el carbón activado.

2. Materiales y métodos

2.1 Reactivos y materiales

La experimentación a escala laboratorio para procedimientos de EC tipo batch se aplicó en medio acuoso en presencia de carbón activado (Calgon Carbon DG-11 6x12 Lote HB184AN-4) en partículas finas, las cuales se han obtenido en los procedimientos de adsorción de oro en CA en tamaños experimentales, se utilizó mortero para reducir tamaño y mallas (Wstyler Test Sieve ASTM E11 Standard) para cribar y generar los tamaños de partícula de 0.106 mm (malla 140, número de serie 195124716) y de 0.053 mm (malla 270, número de serie 201813053) para los procedimientos de adsorción de oro, en un periodo de tiempo de 24 horas, la reacción se realizó en un vaso de precipitado (Pyrex) de 1 litro y movimiento a través de un agitador magnético a 700 rpm (Fisherbrand modelo Isotemp) , utilizando solución de matriz sintética de oro de 1000 mg/L (HPS número de lote 2132210-250) , alcalinizada con 2.5 gramos de hidróxido de sodio (J.T. Baker número de lote Y26C83) , alcanzando un pH dentro del rango de 10.50 y 11.00 (Medidor de pH VWR Modelo BP30CI) , el medio para las pruebas se ajustó a 0.5 litros de solución sintética con una concentración de Au de 10 mg/L, en contacto con 0.25 gramos de CA en los distintos tamaños de partícula. La concentración final de Au en CA fue de 1.663 % para las partículas con un tamaño de 0.106 mm y de 1.562 % para las partículas con un tamaño de 0.053 mm. Se evaluó el desempeño de la EC con electrodos de aluminio y hierro, de

dimensiones de 60 por 30 mm de largo por ancho y por 2 mm de espesor, con una separación inicial de 14 mm y reducción de la distancia a probar. Los electrodos fueron sumergidos a una profundidad de 47 mm en el medio acuoso (5).

2.2 Equipos de laboratorio

Con los siguientes equipos, materiales y reactivos se hizo el acondicionamiento de las muestras sintéticas y el arreglo experimental para el proceso de EC. Fuente de alimentación de corriente directa ajustable marca Hanmatek, con capacidad máxima de 30 V, medidor de pH marca VWR Modelo B10P, medidor de pH VWR Modelo BP30Cl, Parrilla de agitación magnética y Barra de agitación magnética de 3 cm Fisherbrand modelo Isotemp, electrodos de aluminio de 3 cm x 6 cm x 0.2 cm., balanza analítica US Solid, termómetros de mercurio escala - 10 a 110 °C marca France, vasos de precipitado de 1000 mL (Pyrex), embudos de separación de 10 cm de diámetro (Pyrex), papel filtro Whatman No. 40 de 10 cm de diámetro, soluciones estándar para calibración de pH metro con valores de 4, 7 y 10, marca J.T. Baker.

2.3 Procedimientos analíticos

Para conocer la concentración del elemento de interés en solución, su concentración y características en el carbón activado, se utilizaron diversas técnicas para complementar y validar los resultados obtenidos por cada una de ellas. Los métodos utilizados fueron espectroscopia de absorción atómica por flama, espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente, procedimiento de ensaye a fuego y determinación gravimétrica con micro balanza, microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de energía dispersa.

2.3.1 Espectroscopia de absorción atómica

El modelo AA 240 FS de Agilent Technologies fue requerido para la determinación de oro en las soluciones de monitoreo de las pruebas de adsorción atómica en CA, así como para la determinación de oro con determinación por instrumentación analítica y ensaye a fuego, cuando por el límite de detección es la mejor opción para el procedimiento. Con un número de análisis 3 réplicas por alícuota, con el tiempo de toma de muestra de 3 segundos y un tiempo de lectura de 5 segundos por replica, en una curva de calibración de 4 puntos. La curva de calibración de 4 puntos se preparó desde una solución matriz de oro con trazabilidad de una concentración de 1000 mg/L (ppm) de oro, y se preparó con uso de micropipetas automáticas y matraces para aforar en 0.5 – 1.0 – 1.5 – 3.0 ppm de oro, igualando la matriz a 1000 ppm de cianuro de sodio y un pH en un rango de 10.5 a 11.0.

2.3.2 Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

El modelo ICP OES 5110 de Agilent Technologies fue requerido para la determinación de hierro y aluminio en las soluciones remanentes del proceso de electrocoagulación de partículas finas de CA con el respectivo electrodo de hierro y aluminio. Con un número análisis de 3 réplicas por alícuota, con el tiempo de toma de muestra de 6 segundos y un tiempo de lectura de 6 segundos por replica, en una curva de calibración de 5 puntos. La curva de calibración de 5 puntos se preparó desde una solución matriz de hierro y aluminio, respectivamente, de una concentración de 1000 mg/L (ppm), y se preparó con uso de micropipetas automáticas y matraces para aforar en 0.5 – 1.0 – 3.0 – 6.0 – 10.00 ppm de hierro y aluminio, igualando la matriz a 1000 ppm de cianuro de sodio y un pH en un rango de 10.5 a 11.0.

2.3.3 Ensaye a fuego

Se utilizó para la caracterización cuantitativa de oro adsorbido en el CA posterior a los procedimientos de adsorción en medios acuosos cianurados.

2.3.4 Microscopia electrónica de barrido (SEM)

El modelo JSM – 6610LV de JEOL y modelo Pro X de Phenom se utilizaron en la determinación la microestructura del CA en su estado previo y posterior al proceso de EC. Se realizó el análisis morfológico superficial mediante imagen de electrones secundarios y análisis de composición mediante imagen de electrones retrodispersados.

2.3.5 Análisis elemental por dispersión, mediante espectroscopia de energía dispersiva (EED) y mapeos de energía dispersa

El modelo JSM – 6610LV de JEOL y modelo Pro X de Phenom se utilizaron para la caracterización semicuantitativa de las partículas de CA en su estado previo y posterior al proceso de EC. Se realizó el análisis semicuantitativo superficial mediante electrones retrodispersados y el detector de energía que contabilizan la presencia elemental en puntos porcentuales. El procedimiento de mapeo se realizó en un tiempo mínimo de 300 segundos, sin embargo, entre más tiempo se permita el mapeo la precisión de la determinación aumenta.

2.4 Modelos termodinámicos

Los parámetros termodinámicos de la adsorción, es decir, (ΔG , ΔH y ΔS), evocan la espontaneidad y factibilidad del proceso de adsorción, así como la influencia de la temperatura en la adsorción. Generalmente, la determinación del parámetro termodinámico se ha realizado a partir de la ecuación de van't Hoff de la siguiente manera (6):

$$\ln K_{eq} = -\frac{\Delta H^\circ}{RT} + \frac{\Delta S^\circ}{R} \quad (3)$$

Donde, R es la constante universal de los gases (1.987207 Cal/mol K), T es la temperatura (K) y Keq es la constante de equilibrio. El ΔG se puede obtener a partir de cualquiera de las siguientes ecuaciones:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (4)$$

$$\Delta G = -RT \ln K_{eq} \quad (5)$$

El calor de adsorción (ΔH) a una cobertura de superficie constante se calculó utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron (7):

$$\frac{d \ln(C_{eq})}{dT} = -\frac{\Delta H^\circ}{RT^2} \quad (6)$$

Al integrar la ecuación se obtiene la siguiente fórmula:

$$\ln(C_{eq}) = -\left[\frac{\Delta H^\circ}{R}\right]\frac{1}{T} + K \quad (7)$$

Donde K es una constante. De la ecuación 2.21 se puede obtener el valor de ΔS como se muestra a continuación

$$\Delta S = \frac{\Delta H^\circ}{T} - \frac{\Delta G^\circ}{T} \quad (8)$$

2.4.1 Isoterma de Langmuir

Los supuestos del modelo de isoterma Langmuir son cobertura superficial monocapa, sitios superficiales idénticos y equivalentes con la misma energía de activación de sorción de cada molécula, lo que da como resultado una adsorción homogénea y ninguna interacción entre las especies adsorbidas en el plano de la superficie (8,9,10). La expresión matemática de la siguiente ecuación representa la isoterma de Langmuir:

$$q_e = \frac{q_{max}K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (9)$$

Donde, q_e representa la cantidad de adsorbato adsorbido por unidad de peso del adsorbente en equilibrio (mg/g) y C_e es la concentración del soluto en equilibrio (mg/L). Los parámetros, q_{max} y K_L , son las constantes de Langmuir. q_{max} se representa como la máxima capacidad de adsorción de la monocapa y K_L se relaciona con la energía de enlace o parámetro de afinidad del sistema de adsorción. En consecuencia, q_{max} y K_L se corresponden con la unidad de mg/g y L/mg, respectivamente (11).

La anterior ecuación 2.26 puede ser arreglada en forma lineal de la siguiente forma:

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{max}K_L} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (10)$$

La determinación de los parámetros de la isoterma de Langmuir se realizó a través de graficar $1/C_e$ contra $1/q_e$, donde q_e se determinó conforme a la ecuación siguiente:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} V \quad (11)$$

Siendo q_e la cantidad de miligramos adsorbidos por gramo de adsorbente, C_0 la concentración inicial, C_e la concentración en equilibrio o concentración final, W la masa del adsorbente y V el volumen del medio acuoso.

2.5 Análisis cinético

La cinética de adsorción se puede describir con el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood que se ha utilizado a menudo en la discusión del mecanismo de reacción fotocatalítica en sistemas de suspensión, pero, los autores, no han concluido en una definición única para el mecanismo de Langmuir-Hinshelwood (L-H) en reacciones fotocatalíticas. En la mayoría de los casos, los autores han afirmado que una reacción fotocatalítica procede a través del mecanismo L-H cuando se observa una relación recíproca lineal entre la velocidad de reacción y la concentración del sustrato de reacción en una solución (12).

2.5.1 Modelo de Langmuir-Hinshelwood

La cinética de Langmuir-Hinshelwood (LH) es la expresión cinética más utilizada para explicar la cinética de los procesos catalíticos heterogéneos. La expresión de Langmuir-Hinshelwood que explica la cinética de los sistemas catalíticos heterogéneos viene dada por (12):

$$r = -\frac{dC}{dt} = \frac{k_r K C}{1 + K C} \quad (12)$$

Donde k_r representa la constante cinética de reacción con respecto al tiempo, K es la constante de equilibrio de adsorción y C es la concentración del material a adsorber. La ecuación de Langmuir-Hinshelwood puede volverse lineal de la siguiente forma para ajustar los datos experimentales al modelo y encontrar sus respectivas constantes.

$$\frac{1}{r_0} = \frac{1}{k_r} + \frac{1}{k_r K C_0} \quad (13)$$

La determinación de los parámetros del modelo de Langmuir-Hinshelwood se realiza a través de graficar $-dt/dC$ contra $1/C$.

2.5 Pruebas experimentales de EC de partículas finas de CA

Utilizando el diseño de Taguchi, experimentando en dos etapas bajo el arreglo L4 (2^3) y una tercera etapa bajo el arreglo L9 (3^4) es posible analizar el proceso y los parámetros que funcionan con mayor consistencia en el entorno operativo.

La identificación de las pruebas inicia con una E refiriéndose a la etapa, seguido de la numeración de la etapa, numerado de la etapa 1 a la etapa 3, seguido de P

con referencia a prueba, numerado del 1 al 4 y finaliza con la identificación del diseño experimental L4 para la etapa 1 y 2 con referencia a las pruebas bajo el diseño de Taguchi L4 (2^3). La etapa 3, se realizó con 9 pruebas, numerado del 1 al 9, y finaliza con la identificación del diseño experimental L9 con referencia a las pruebas bajo el diseño de Taguchi L9 (3^4). La Tabla 1 muestra las condiciones y pruebas realizadas.

Tabla 1. Condiciones de operación de las pruebas de EC bajo diseños experimentales de Taguchi

Identificación	pH	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	Electrodo Al/Fe	Voltaje V	Amperaje A	Tiempo Residencia min	Tamaño de CA mm	Distancia de Electrodos mm
E1P1L4	8.10	640	Al	15	0.108	5	0.053	14
E1P2L4	7.51	635	Al	25	0.220	10	0.053	14
E1P3L4	7.40	633	Fe	15	0.128	10	0.053	14
E1P4L4	7.56	645	Fe	25	0.253	5	0.053	14
E2P1L4	7.50	640	Al	15	0.201	5	0.053	7
E2P2L4	7.54	633	Al	15	0.158	10	0.053	10
E2P3L4	7.40	630	Al	25	0.402	10	0.053	7
E2P4L4	7.70	635	Al	25	0.278	5	0.053	10

Identificación	pH	Conductividad $\mu\text{S/cm}$	Electrodo	Voltaje V	Amperaje A	Tiempo Residencia min	Peso de CA mg	Tamaño de CA mm	Distancia de Electrodos mm
E3P1L9	7.29	629	Al	20	0.291	10	0.1	0.106	7
E3P2L9	7.54	651	Al	20	0.272	12	0.2	0.053	7
E3P3L9	7.40	649	Al	20	0.271	15	0.4	Mix	7
E3P4L9	7.46	637	Al	25	0.336	15	0.2	0.106	7
E3P5L9	7.49	647	Al	25	0.360	10	0.4	0.053	7
E3P6L9	7.58	641	Al	25	0.367	12	0.1	Mix	7
E3P7L9	7.51	644	Al	30	0.410	12	0.4	0.106	7
E3P8L9	7.55	639	Al	30	0.431	15	0.1	0.053	7
E3P9L9	7.52	649	Al	30	0.455	10	0.2	Mix	7

3. Resultados

3.1 Pruebas de electrocoagulación de partículas finas de CA

Se cataloga a la prueba E1P2L4, como la prueba con mejores resultados de la etapa 1, registró un pH del medio acuoso de 7.51, 635 $\mu\text{S/cm}$, induciendo al medio un voltaje de 25 V y amperaje de 0.220, con el uso del electrodo de aluminio, seleccionado para las posteriores etapas, con una separación de 14 mm, durante un tiempo de 10 minutos, para la recuperación de partículas finas de tamaño de 0.053 mm.

El proceso de EC con electrodo de aluminio de partículas de CA a 0.106 mm muestra un proceso de recubrimiento de mayor uniformidad, esto en comparación con lo obtenido con el electrodo de hierro, lo cual se puede observar en la Figura 1 en las imágenes microscópicas a 750 y 600 aumentos, respectivamente, para las partículas de CA.

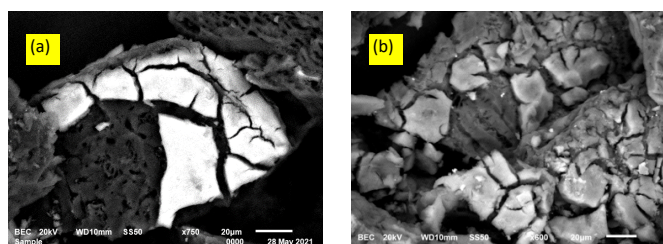


Figura 1. Proceso de EC con electrodo de hierro (a), y electrodo de aluminio (b), con caracterización por SEM de partículas de CA.

Los resultados de la etapa 2 muestran que, a mayor densidad de corriente y exposición en cuanto al tiempo de residencia, existe una mayor degradación del electrodo de aluminio, por lo que se vuelve importante la inversión de corriente en tiempos oportunos para evitar un desgaste disparado de los electrodos.

La etapa 3 se desarrolla bajo el diseño experimental de Taguchi L9(3⁴), donde las variables experimentales son el voltaje aplicado, el tamaño de partícula, el peso de CA y el tiempo de residencia. Los parámetros de seguimiento para esta etapa son pH, conductividad del medio acuoso, densidad de corriente. La Tabla 2 presenta los resultados de las pruebas con uso de electrodo de Al, de las tres etapas experimentales, la tabla se ordenó en orden ascendente con respecto a la concentración de Au determinada en CA, para analizar el comportamiento de las demás variables con respecto a dicho parámetro.

Tabla 2. Parámetros de las pruebas de EC con uso de electrodos de Al

ID	pH	Electrodo	Voltaje	Amperaje	Tiempo Residencia	Tamaño de CA	Distancia de Electrodo	Peso Final CA	Au CA (%)	Al CA (%)
			V	A	min	mm	mm	(g)	(%)	(%)
E3P8L9	7.55	Al	30	0.431	15	0.053	7	0.2740	0.61	16.24
E3P6L9	7.58	Al	25	0.367	12	Mix	7	0.2071	0.88	11.54
E3P4L9	7.46	Al	25	0.336	15	0.106	7	0.3168	1.06	9.05
E3P9L9	7.52	Al	30	0.455	10	Mix	7	0.3084	1.09	9.50
E3P2L9	7.54	Al	20	0.272	12	0.053	7	0.2630	1.25	6.90
E3P1L9	7.29	Al	20	0.291	10	0.106	7	0.1518	1.31	7.10
E3P5L9	7.49	Al	25	0.360	10	0.053	7	0.4633	1.41	4.89
E3P7L9	7.51	Al	30	0.410	12	0.106	7	0.5111	1.41	5.51
E3P3L9	7.40	Al	20	0.271	15	Mix	7	0.4815	1.43	5.17
E2P3L4	7.40	Al	25	0.402	10	0.053	7	0.4494	1.45	4.24
E2P2L4	7.54	Al	15	0.158	10	0.053	10	0.4037	1.60	2.01
E1P2L4	7.51	Al	25	0.220	10	0.053	14	0.4184	1.61	1.38
E2P4L4	7.70	Al	25	0.278	5	0.053	10	0.3831	1.72	1.65
E2P1L4	7.50	Al	15	0.201	5	0.053	7	0.3702	1.72	1.10
E1P1L4	8.10	Al	15	0.108	5	0.053	14	0.3589	1.83	0.38

Los resultados de la EC en partículas de distintos tamaños se muestran en la Figura 2, se realizó mediante MEB en la función de EED, lo cual ilustra de manera muy precisa el agregado de partículas de distintos tamaños, rodeados por lo que

la función de EDD muestra como Aluminio-Oxígeno en color azul y naranja, mientras que en el centro en azul celeste se muestra Carbón, en conjunto y de acuerdo a la escala, se muestra un coágulo de CA y $Al(OH)_3$ de un tamaño cercano a las 400 μm .

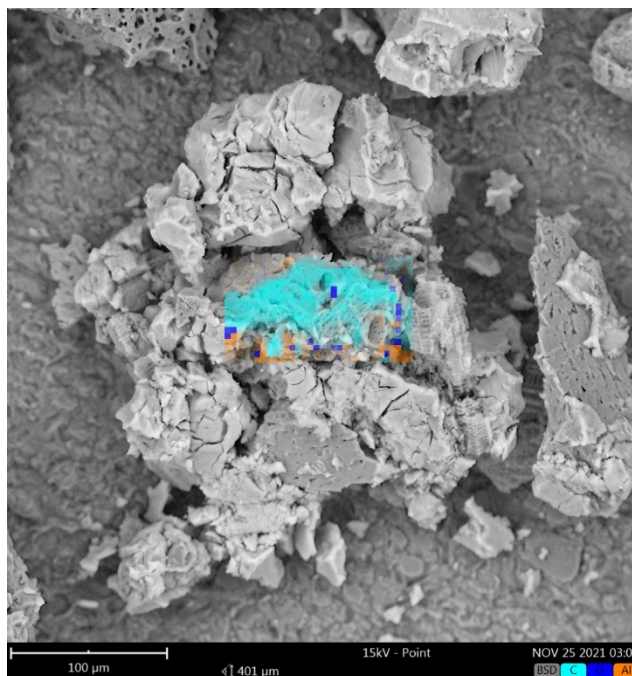


Figura 2. Ilustración de la coagulación de partículas polidispersas de CA por SEM y EED de la prueba E3P3L9.

3.2 Análisis termodinámico de los procesos de EC con uso de la isoterma de Langmuir

El modelo de isoterma de adsorción de Langmuir se utilizó para describir la adsorción en equilibrio del sistema. La Tabla 3 muestra los datos experimentales de la EC de CA con electrodos de aluminio utilizando el modelo termodinámico de la isoterma de Langmuir.

Tabla 3. Datos experimentales de la EC de CA con electrodos de aluminio utilizando la isoterma de Langmuir

Masa de Electrodo	C_i	C_e	$1/C_e$	$\log C_e$	$\ln C_e$	q_e	$1/q_e$	$\log q_e$
g	mol/L	mol/L						
0.006	0.067	0.009	116.8458	-2.068	-4.761	5.10	0.19621	0.707
0.018	0.067	0.002	526.1251	-2.721	-6.266	1.82	0.55005	0.260
0.007	0.067	0.008	129.1836	-2.111	-4.861	4.27	0.23444	0.630
0.021	0.067	0.002	664.5792	-2.823	-6.499	1.56	0.64208	0.192
0.040	0.067	0.001	1280.4479	-3.107	-7.155	0.83	1.20320	-0.080

La Tabla 4 muestra los parámetros obtenidos de la EC de CA utilizando la isoterma de Langmuir, de la gráfica de $1/C_e$ vs $1/q_e$, grafica que se observa en la

Figura 3, donde se obtuvo un valor de R^2 de 0.998, lo cual es resultado de un proceso controlado bajo el modelo de la isoterma antes mencionado.

Tabla 4. Parámetros obtenidos de la EC de CA utilizando la isoterma de Langmuir ($1/C_e$ vs $1/q_e$)

Electrodo	Parámetros					
	b	m	q_{\max} (mg/g)	K_L (L/mg)	R_L	R^2
Aluminio	0.1037	0.0008	10	129.62	0.1038	0.998

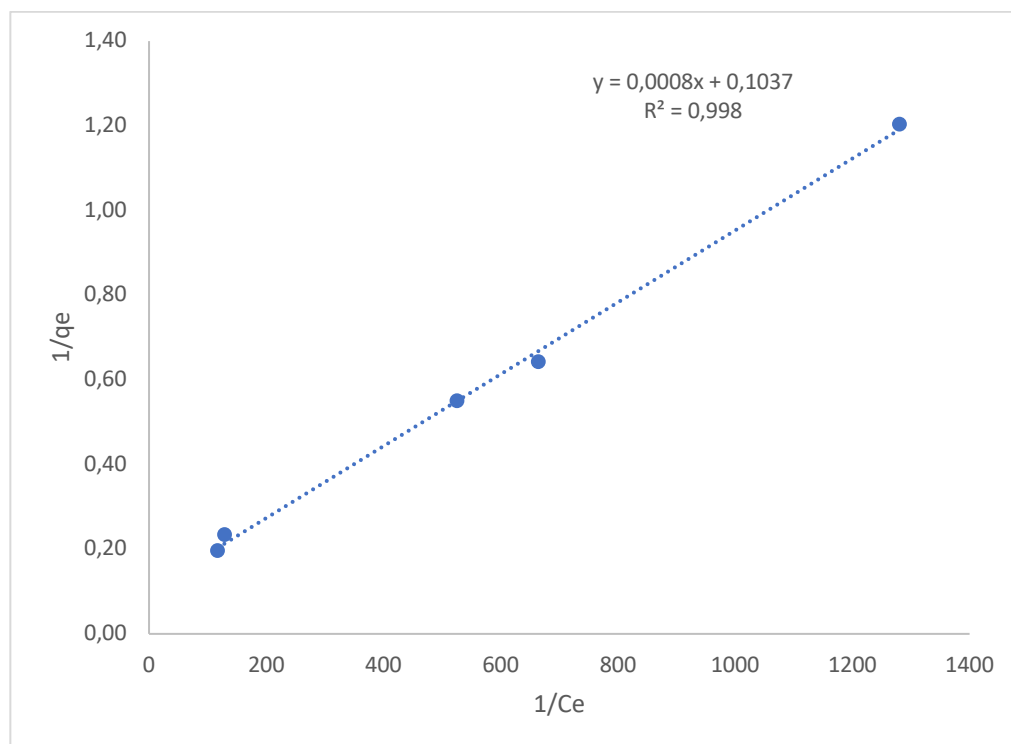


Figura 3. Gráficos de EC de CA utilizando la isoterma de Langmuir ($1/C_e$ vs $1/q_e$)

Este modelo de adsorción ha sido desarrollado para explicar el fenómeno de quimisorción que puede ocurrir en diferentes sitios de adsorción con la misma energía de adsorción, lejos de la cobertura superficial y sin contacto entre las moléculas adsorbidas. El modelo de Langmuir también supone una deposición monocapa del adsorbente sobre la superficie del adsorbato con un número limitado de sitios idénticos (13).

El valor negativo de ΔG indicó la factibilidad de la reacción y la naturaleza espontánea de la adsorción a una temperatura dada para la adsorción de partículas de CA por las especies de aluminio generadas durante la EC (14,15). Los valores de ΔH entre los valores de 4.78 a 9.55 Kcal/mol hablan de un proceso de adsorción física o fisorción, mientras que valores en el rango de 19.11 a 95.54 Kcal/mol demuestran un proceso de adsorción química o quimisorción (16). En el presente estudio, el valor positivo de ΔH indica que el tipo de adsorción es quimisorción y es de naturaleza endotérmica para el proceso de EC (13,17). El ΔS positivo sugiere el aumento de la aleatoriedad en la interfaz de solución sólida

durante la adsorción en el proceso de EC (16), lo cual sugiere que las partículas finas de CA adsorbidas remplazan algunas moléculas de agua de la solución previamente adsorbidas sobre la superficie de las especies de aluminio (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros termodinámicos obtenidos de la EC de oro en CA utilizando la isoterma de Langmuir ($1/C_e$ vs $1/q_e$)

Parámetro	kcal/Mol
Delta G	-2.881
Delta H	79.582
	kcal/MolK
Delta S	0.277

El valor negativo de ΔG indicó la factibilidad de la reacción y la naturaleza espontánea de la adsorción a una temperatura dada para la adsorción de partículas de CA por las especies de aluminio generadas durante la EC (14,15). Los valores de ΔH entre los valores de 4.78 a 9.55 Kcal/mol hablan de un proceso de adsorción física o fisorción, mientras que valores en el rango de 19.11 a 95.54 Kcal/mol demuestran un proceso de adsorción química o quimisorción (16). En el presente estudio, el valor positivo de ΔH indica que el tipo de adsorción es quimisorción y es de naturaleza endotérmica para el proceso de EC (13,17). El ΔS positivo sugiere el aumento de la aleatoriedad en la interfaz de solución sólida durante la adsorción en el proceso de EC (16), lo cual sugiere que las partículas finas de CA adsorbidas remplazan algunas moléculas de agua de la solución previamente adsorbidas sobre la superficie de las especies de aluminio.

3.3 Análisis cinético de los procesos de EC con uso del modelo cinético Langmuir-Hinshelwood

A los datos experimentales de la EC de CA con electrodo de aluminio presentes en la Tabla 6 se les aplicó regresión exponencial, como se muestra en la Figura 4, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 7.

Tabla 6. Datos experimentales de la EC de CA con electrodo de aluminio utilizando el modelo cinético Langmuir-Hinshelwood

x	y
Tiempo (min)	C_e (mg/L)
0	800.00
5	102.79
10	53.81
10	26.38
10	22.83
10	18.07
15	9.38

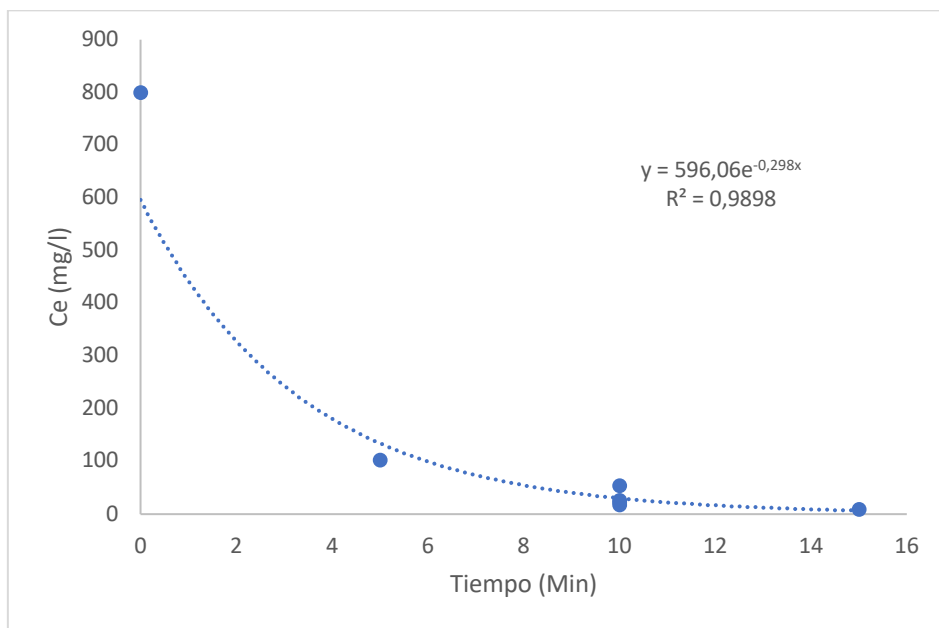


Figura 4. Gráficos del modelo cinético Langmuir-Hinshelwood (Tiempo vs C_e)

Tabla 7. Parámetros experimentales de la EC de CA con electrodo de aluminio utilizando el modelo cinético Langmuir-Hinshelwood

Electrodo	Parámetros							
	Media X	Media Y'	m	b'	b	R ²	k	K
Aluminio	8.57	3.83	-0.2983	6.39	596.06	0.9898	0.0017	-1998.44

Se utilizó la ecuación linealizada del modelo cinético de Langmuir-Hinshelwood, para encontrar la constante cinética de la reacción k y la constante de velocidad de adsorción K . La ecuación de Langmuir-Hinshelwood se empleó utilizando datos mostrados en la Tabla 8, generando los valores $1/C_e$ y $-dt/dC$, los cuales fueron graficados en regresión lineal, donde se logró la Figura 5 y subsecuentemente se obtuvieron los parámetros.

Tabla 8. Datos experimentales de la EC de CA con electrodo de aluminio para la determinación de contante de velocidad cinética utilizando el modelo cinético Langmuir-Hinshelwood

x	y	y' = ln y	xy'	x ²	y' ²	1/C _e	dt/dC
Tiempo (min)	C _e (mg/L)						
0	800.00	6.68	0.00	0	44.68	0.00	1.04
5	102.79	4.63	23.16	25	21.46	0.01	6.10
10	53.81	3.99	39.85	100	15.88	0.02	11.38
10	26.38	3.27	32.73	100	10.71	0.04	22.89
10	22.83	3.13	31.28	100	9.78	0.04	26.41
10	18.07	2.89	28.94	100	8.38	0.06	33.28

Tabla 8. Datos experimentales de la EC de CA con electrodo de aluminio para la determinación de contante de velocidad cinética utilizando el modelo cinético Langmuir-Hinshelwood

x	y	y' = ln y	xy'	x ²	y ²	1/C _e	dt/dC
Tiempo (min)	C _e (mg/L)						
15	9.38	2.24	33.58	225	5.01	0.11	63.84
SUMA 60	1033.27	26.84	189.54	650	115.91		

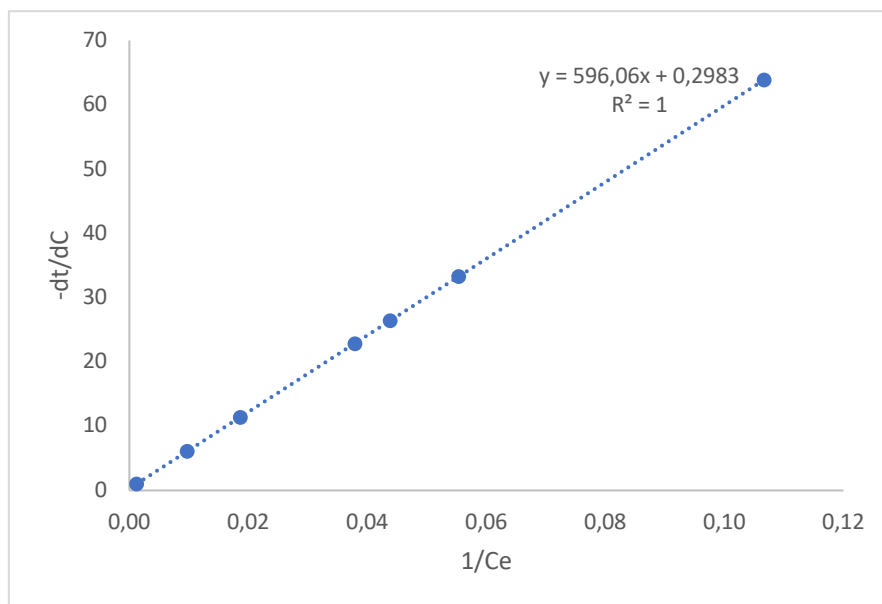


Figura 5. Gráficos del modelo cinético Langmuir-Hinshelwood (1/C_e vs -dt/dC)

Los parámetros experimentales y constantes de cinética (k) y constante de adsorción (K) de la EC de CA con electrodo de aluminio utilizando el modelo cinético Langmuir-Hinshelwood de la Tabla 9, nos muestra que la constante cinética (k) es mayor que la constante de adsorción (K), lo que significa que el mecanismo controlante para el proceso de recuperación de partículas finas de CA con EC es la velocidad de adsorción de dichas partículas sobre la superficie de las especies de aluminio generadas por el proceso electroquímico en vez de la velocidad de conversión del mismo.

Tabla 9. Parámetros experimentales y constantes de cinética (k) y constante de adsorción (K) de la EC de CA con electrodo de aluminio utilizando el modelo cinético Langmuir-Hinshelwood

Electrodo	Parámetros					
	m	b	R	R ²	k	K
Aluminio	596.06	0.30	1	1	3.35	0.0005

4. Discusión

El tamaño de partícula es una variable de estudio para la etapa 3 del diseño experimental, debido al interés de analizar la capacidad del proceso de EC para coagular partículas de distintos tamaños, el estudio de Mattenson et al (18), menciona que la coagulación entre partículas de diferente tamaño dentro de una suspensión polidispersa ocurre más rápidamente que entre partículas del mismo tamaño, ya que la tendencia es que las partículas muy pequeñas se adhieran a las más grandes, por lo que concuerda con el presente estudio en la variable de la coagulación de los dos distintos tamaños de partícula de CA. Por el contrario, la coagulación entre partículas del mismo tamaño conduce gradualmente a una polidispersidad, y algunas aumentan de tamaño en relación con otras. Lo anterior indica que en condiciones reales donde se encuentran las partículas de CA en sus distintos tamaños, la EC funcionará de mejor forma debido a la tendencia de las partículas pequeñas por adherirse a las de mayor tamaño.

La Figura 6 muestra los gráficos de la variable detectada como la de mayor influencia, siendo el amperaje aplicado al medio, en su relación con la concentración de Au y Al en las partículas de CA, como se observa en el gráfico (1), en su relación con la concentración de Au y el peso total de producto recuperado, presente en el gráfico (2).

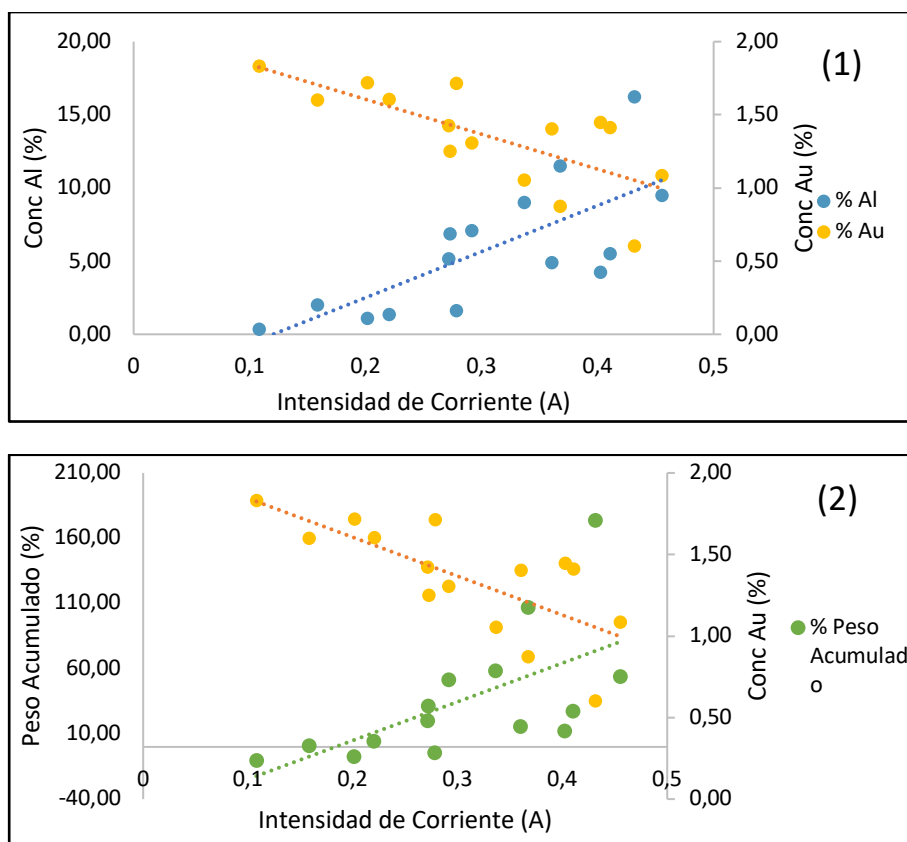


Figura 6. Gráficos de intensidad de corriente contra la concentración de aluminio y oro (1), e intensidad de corriente contra peso acumulado total y concentración de oro (2).

La variación de voltaje muestra que a mayor voltaje inducido aumenta el amperaje, que directamente aumenta la formación de coágulos y colabora en la recuperación de las partículas de CA, como se muestra en la Figura 6. El tiempo de residencia muestra que, en periodos prolongados de inducción de corriente al medio acuoso, aumenta la recuperación de partículas de CA, y aumenta el porcentaje de aluminio depositado, lo anterior se puede observar en la Tabla 2.

La etapa 1 muestra en los resultados experimentales obtenidos lo siguiente, se puede inferir que los factores de oro en solución y aluminio en solución, muestran diferencias significativas entre el electrodo de aluminio y el de hierro ($p \leq 0.05$). El valor obtenido para el coeficiente de correlación de Pearson (R) fue de 0.9953 y 0.9866, lo cual indica una correlación de 99.53 y 98.66% para oro en solución y aluminio en solución, respectivamente. En relación a los demás factores (peso final, %CA, oro en CA, aluminio en CA), no se encontraron diferencias significativas ($p \geq 0.05$).

La etapa 2 desarrolla las pruebas bajo el diseño de Taguchi L4(2^3) de donde se desprende los siguientes puntos: El diseño de Taguchi L4(2^3) en la etapa 2, indica en su evaluación gráfica que las condiciones analíticas a evaluar usando electrodo de aluminio son, voltaje a 25 V, distancia de electrodos a 7 mm y tiempo de residencia de 10 min. Con base en los resultados experimentales obtenidos, se puede inferir que los factores evaluados en función de las variables de salida, no muestran diferencias significativas ($p \geq 0.05$). Los resultados mostrados indican que es posible utilizar cualquiera de los parámetros probados sin mayor diferencia con respecto a los resultados obtenidos en oro en solución, aluminio en solución, peso final de CA, oro en CA y aluminio en CA. Estos resultados permiten trabajar con rangos más amplios para voltaje y tiempo de residencia, Mouedhen *et al*, (19) y Malakootian *et al*, (20), muestran resultados donde la remoción de metales incrementa con el aumento del tiempo de operación, al prolongar la inducción de corriente al medio acuoso. Los resultados de la variable de distancia entre los electrodos muestran que a menor separación hay una mayor intensidad de corriente y mejores resultados del proceso de EC (5,21).

La etapa 3 desarrolla las pruebas bajo el diseño de Taguchi L9(3^4) de donde se desprende los siguientes puntos: El diseño de Taguchi L9(3^4) en la etapa 3, indica que las condiciones analíticas a evaluar usando electrodo de aluminio son, voltaje de 30 V, tamaño de partícula de 0.053 mm, peso de CA de 0.1 mg y tiempo de proceso de EC de 15 min. Con base en los resultados experimentales obtenidos, se puede inferir que los factores de peso final, Au en CA y Al en CA, muestran diferencias significativas contra el peso de CA ($p \leq 0.05$). En relación a los demás factores (voltaje, tamaño de partícula y tiempo de residencia), no se encontraron diferencias significativas ($p \geq 0.05$). Los resultados muestran que a menor concentración de CA en el medio acuoso el proceso de EC logra mayor eficiencia para la recuperación de partículas finas CA y la respectiva recuperación de Au. Esto quizá se deba a una sobrecarga en las pruebas con 0.2 y 0.4 g de CA por cada 500 mL de solución donde la recuperación no es óptima. Dichos resultados muestran coherencia debido a que la concentración de partículas finas de CA en soluciones industriales suele presentarse por debajo de 0.1 g/L (22).

ΔH y ΔS son independientes de la temperatura. Los valores positivos y negativos de ΔH representan reacciones endotérmicas y exotérmicas, respectivamente. Un valor positivo de ΔS refleja la afinidad del adsorbente hacia el elemento a adsorber, la mayor aleatoriedad en la interfase sólido-líquido, mayor grado de libertad del elemento a adsorber y condiciones más favorables para que ocurra el proceso de adsorción. Sin embargo, un ΔS negativo implica una interfase menos activa del sistema sólido-líquido que causa una reducción en la adsorción. Los valores negativos y positivos de ΔG reflejan el proceso de adsorción espontánea y no espontánea, respectivamente. Eventualmente, la factibilidad termodinámica de una reacción depende de ΔG . La estimación correcta del parámetro termodinámico es esencial para delinear el proceso de adsorción (16,23).

El modelo termodinámico de Langmuir fue el que se ajustó para los análisis de los procesos de EC, con una R^2 de 0.998. El valor -2.881 Kcal/mol negativo de ΔG indicó la factibilidad de la reacción y la naturaleza espontánea de la adsorción (24). El valor 79.582 Kcal/mol positivo de ΔH indica que el tipo de adsorción es quimisorción y es de naturaleza endotérmica para el proceso de EC (13,17). El valor 0.277 Kcal/mol positivo de ΔS sugiere el aumento de la aleatoriedad en la interfaz de solución sólida durante la adsorción en el proceso de EC (16).

El modelo cinético de Langmuir-Hinshelwood fue el que se ajustó para los análisis de los procesos de EC (25), con una R^2 de 1. El proceso de EC de CA con electrodos de aluminio, mostró valores de la constante de cinética (k) de 3.35 y de la constante de adsorción (K) de 0.0005 con el uso del modelo cinético Langmuir-Hinshelwood. La constante cinética (k) resultó mayor que la constante de adsorción (K), lo que significa que el mecanismo controlante fue la velocidad de adsorción de dichas partículas sobre la superficie de las especies de aluminio generadas por el proceso electroquímico mismo (12).

5. Conclusiones

Ambos electrodos (Hierro y Aluminio) lograron coagular de manera exitosa las partículas de CA presentes en el medio acuoso en una concentración de 0.80 mg/L (0.067 mol/L); sin embargo, el proceso de EC con electrodos de aluminio muestra un mejor desempeño en la recuperación de las partículas finas.

Se observó de manera característica en las fotografías macroscópicas de los reactores que la EC forma coágulos que aglomeran las partículas de CA, que con el paso del tiempo parte de ellas se precipitan y sedimentan en el fondo del recipiente, unas más lentas que otras. Los coágulos con un aspecto gel son las que retardan en mayor tiempo su sedimentación, y se observan suspendidas en el medio acuoso.

Las imágenes microscópicas obtenidas con el uso del SEM muestran a detalle como recubrimiento la presencia de hierro y aluminio depositado sobre las partículas de CA. Se observó también la unión de dos o más partículas, coagulándolas en un solo compuesto. Se observa un crecimiento de la partícula

en cuanto a sus dimensiones, comparándolas con las determinaciones anteriores a los procesos de EC.

Las mejores condiciones de operación para el proceso de EC en un medio acuoso son las siguientes; uso de electrodos de Al, 30V, 0.4 A, 7 mm de distancia entre electrodos y 12 minutos de la operación de EC. Con estas condiciones se obtuvo una recuperación de partículas de CA en el rango de 96 a 100%.

Utilizando el modelo termodinámico de Langmuir se determinó una ΔG de -2.881 Kcal/mol que indicó la factibilidad de la reacción y la naturaleza espontánea de la adsorción, ΔH de 79.582 Kcal/mol, valor positivo que indica quimisorción y naturaleza endotérmica y ΔS de 0.277 Kcal/mol que sugiere el aumento de la aleatoriedad del proceso de EC.

El modelo cinético de Langmuir-Hinshelwood arrojó que el mecanismo controlante es la velocidad de adsorción con un valor de la constante de cinética (k) es de 3.35 y constante de adsorción (K) es de 0.0005 del proceso de EC de CA.

Patentes: Hay patentes en proceso resultantes del trabajo reportado en este manuscrito.

Materiales suplementarios: Este manuscrito no tiene material suplementario.

Contribución de los autores: RMP- diseño y realización de experimentos, recolección de datos, análisis de datos, redacción del primer borrador del manuscrito. JRPT- conceptualización, orientación, revisión y refinamiento del manuscrito. JLVG- análisis químico. GGZ- análisis químico. AMGA- orientación técnica para trabajos experimentales.

Financiamiento: Esta investigación no recibió fondos para la investigación.

Agradecimientos: Al Tecnológico Nacional de México, Campus Instituto Tecnológico de Saltillo, Molimentales del Noroeste S.A. de C.V. & Laboratorio Tecnológico de Metalurgia LTM S.A de C.V. del Corporativo Sonora Naturals, por su valioso apoyo.

Conflicto de intereses: Los autores declaramos que no existe conflicto de intereses para la divulgación de los resultados, discusión, análisis de datos y conclusiones presentados en el presente trabajo.

Referencias

1. B Cevallos Toledo R, F Aragón-Tobar C, Gámez S, de la Torre E. Reactivation process of activated carbons: Effect on the mechanical and adsorptive properties. *Molecules* [Internet]. 2020;25(7). Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25071681>
2. Martínez-Mendoza KL, Barraza Burgos JM, Marriaga-Cabrales N, Machuca-Martinez F, Barajas M, Romero M. Production and characterization of activated carbon from coal for gold adsorption in cyanide solutions. *Ing Investig* [Internet]. 2020;40(1):34–44. Available from: <http://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v40n1.80126>
3. Marsden JO, C. Iain House. *The chemistry of gold extraction*. 2nd ed. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration; 2006.
4. Young CA, Dunne RC, Kawatra SK. *SME Mineral Processing and Extractive Metallurgy Handbook*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, Incorporated. 2019;1309–20.
5. García-Carrillo C, Parga-Torres J, Moreno-Casillas H, Sellschopp-Sanchez FS. Kinetics and energy consumption for a three-stage electrocoagulation process for the recovery of Au and Ag from cyanide leachates. *Metals (Basel)* [Internet]. 2019;9(7):758. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/met9070758>

6. Chen T, Da T, Ma Y. Reasonable calculation of the thermodynamic parameters from adsorption equilibrium constant. *J Mol Liq* [Internet]. 2021;322(114980):114980. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114980>
7. Lyubchik S, Lyubchik A, Lygina O, Lyubchik S, Fonseca I. Comparison of the thermodynamic parameters estimation for the adsorption process of the metals from liquid phase on activated carbons. In: *Thermodynamics - Interaction Studies - Solids, Liquids and Gases*. InTech; 2011.
8. Sandoval-Ibarra FD, López-Cervantes JL, Gracia-Fadrique J. Ecuación de Langmuir en líquidos simples y tensoactivos. *Educ quim* [Internet]. 2015;26(4):307–13. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eq.2015.03.002>
9. Azizian S, Eris S, Wilson LD. Re-evaluation of the century-old Langmuir isotherm for modeling adsorption phenomena in solution. *Chem Phys* [Internet]. 2018; 513:99–104. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemphys.2018.06.022>
10. Alafnan S, Awotunde A, Glatz G, Adjei S, Alrumaih I, Gowida A. Langmuir adsorption isotherm in unconventional resources: Applicability and limitations. *J Pet Sci Eng* [Internet]. 2021;207(109172):109172. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109172>
11. Guo X, Wang J. Comparison of linearization methods for modeling the Langmuir adsorption isotherm. *J Mol Liq* [Internet]. 2019;296(111850):111850. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111850>
12. Kumar KV, Porkodi K, Rocha F. Langmuir–Hinshelwood kinetics – A theoretical study. *Catal Commun* [Internet]. 2008;9(1):82–4. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.catcom.2007.05.019>
13. Moneer AA, El-Mallah NM, El-Sadaawy MM, Khedawy M, Ramadan MSH. Kinetics, thermodynamics, isotherm modeling for removal of reactive Red 35 and disperse yellow 56 dyes using batch bi-polar aluminum electrocoagulation. *Alex Eng J* [Internet]. 2021;60(4):4139–54. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aej.2021.02.061>
14. Lima EC, Hosseini-Bandegharai A, Moreno-Piraján JC, Anastopoulos I. A critical review of the estimation of the thermodynamic parameters on adsorption equilibria. Wrong use of equilibrium constant in the Van't Hoof equation for calculation of thermodynamic parameters of adsorption. *J Mol Liq* [Internet]. 2019; 273:425–34. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2018.10.048>
15. Aitlaalim A, Boudalia M, Ouanji F, Echihi S, Guenbour A, Belleaouchou A, et al. Essential Oil of *Brachychiton* as Eco-Friendly Green Inhibitor for the Corrosion Control of Mild steel in Hydrochloric Acid Medium. *Der Pharma Chemica*. 2016;8(19):155–65.
16. Raghav S, Kumar D. Adsorption equilibrium, kinetics, and thermodynamic studies of fluoride adsorbed by tetrametallic oxide adsorbent. *J Chem Eng Data* [Internet]. 2018;63(5):1682–97. Available from: <http://dx.doi.org/10.1021/acs.jced.8b00024>
17. Kim T, Kim T-K, Zoh K-D. Removal mechanism of heavy metal (Cu, Ni, Zn, and Cr) in the presence of cyanide during electrocoagulation using Fe and Al electrodes. *J Water Proc. engineering* [Internet]. 2020;33(101109):101109. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101109>
18. Matteson MJ, Dobson RL, Glenn RW Jr, Kukunoor NS, Waits WH III, Clayfield EJ. Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles. *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp* [Internet]. 1995;104(1):101–9. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/0927-7757\(95\)03259-g](http://dx.doi.org/10.1016/0927-7757(95)03259-g)
19. Mouedhen G, Feki M, Wery MDP, Ayedi HF. Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *J Hazard Mater* [Internet]. 2008;150(1):124–35. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.04.090>
20. Malakootian M, Yousefi N. The efficiency of electrocoagulation process using aluminum electrodes in removal of hardness from water. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 2009;6(2):131–6.
21. Suryaningsih N, Widayatno T, Sugiharto A, Fuadi AM. The effectivity of aluminum electrode for river water purification using electrocoagulation. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng* [Internet]. 2021;1053(1):012130. Available from: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/1053/1/012130>
22. Tahli, L., & Wahyudi, T. Desorption of gold and silver from activated carbon. *Indonesian Mining Journal* [Internet]., 2017; 20(1), 39–47. Available from: <https://doi.org/10.30556/imj.vol20.no1.2017.184>
23. Chou W-L, Wang C-T, Chang W-C, Chang S-Y. Adsorption treatment of oxide chemical mechanical polishing wastewater from a semiconductor manufacturing plant by electrocoagulation. *J Hazard Mater* [Internet]. 2010;180(1–3):217–24. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.04.017>
24. Parga JR, Valenzuela JL, Munive GT, Vazquez VM, Rodriguez M. Thermodynamic study for arsenic removal from freshwater by using electrocoagulation process. *Adv Chem Eng Sci* [Internet]. 2014;04(04):548–56. Available from: <http://dx.doi.org/10.4236/aces.2014.44056>
25. Zhian H, Noroozi Pesyan N. Investigating changes in the physical and chemical effects of tartarazine dye removal on industrial wastewater by electrocoagulation method. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2021; 40:123–32.