



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Adsorción de Oro y Plata en Especies Magnéticas Formadas en el Proceso de Electrocoagulación

Adsorption of Gold and Silver on Magnetic Species Formed during the Electrocoagulation process

Parga-Torres, J.R.^a, García-Carrillo, M.C.^b, Valenzuela-García, J.L.^c, Sánchez-Valdéz, E.^a, Moreno-Casillas, H.A.^b

^a Departamento Metal Mecánica, Instituto Tecnológico de Saltillo. C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, México.

^b Depto. Química-Bioquímica, Instituto Tecnológico de la Laguna. C.P. 27000, Torreón, Coahuila, México.

^c Departamento de Ingeniería Química y Metalúrgica, Universidad de Sonora. C.P. 83000, Hermosillo, Sonora, México.

Correspondencia: jrparga@itsaltillo.edu.mx, mgarciac@correo.itlalaguna.edu.mx, jvalen@iq.uson.mx, esteban.valdes@itsaltillo.edu.mx, hamorenoc@correo.itlalaguna.edu.mx

Innovación tecnológica: Industria Química, Petróleo, Shale Gas y Minería.

Área de aplicación industrial: Metalurgia, Recuperación de metales, Remoción de contaminantes en soluciones acuosas.

Recibido: 24 Agosto 2017.

Aceptado: 20 Octubre 2017.

Abstract

In metallurgical operations, most used processes for gold and silver recovery of minerals are Activated Carbon in pulp, Merrill Crowe and Ion Exchange Resins, which are generally used for concentration and purification of gold and silver from cyanide solutions. Among several options available for recovery of precious metals from cyanide solutions, Electrocoagulation (EC) is a very promising electrochemical treatment technique that does not require high concentrations of gold and silver in cyanide solutions.

First, this study will provide an introduction to the fundamental concepts of the EC method for recovery of precious metals from cyanide solutions. In this research, Powder X-ray Diffraction, Scanning Electron Microscopy and Transmission Mossbauer Spectroscopy were used to characterize the solid products formed at iron electrodes during the EC process. The results suggest that magnetite particles and amorphous iron oxyhydroxides present in the EC products remove gold and silver in 5 minutes with an efficiency of more than 99 % from cyanide impregnated solutions. These results were applied to the Mexican mining companies: Grupo

Minero Bacis, Minera Williams and Minera Avino, samples of these three, showed recovery of gold and silver higher than 99%.

Key Words: Cyanidation, Electrocoagulation, recovery of gold and silver.

Resumen

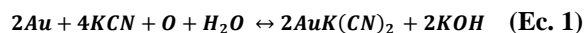
En operaciones metalúrgicas, los procesos más utilizados para la recuperación de oro y plata de sus minerales son: el de Carbón Activado en pulpa, proceso Merrill Crowe y el de Resinas de Intercambio Iónico, los cuales en general son usados para la concentración y purificación del oro y plata de soluciones de cianuración. Aunque existen diferentes opciones para recuperar metales preciosos de soluciones de cianuración, el proceso de Electrocoagulación (EC) es una técnica de tratamiento prometedora, la cual no requiere de altas concentraciones de oro y plata en las soluciones de cianuración. Primero, en este estudio se da una introducción a los conceptos fundamentales de la recuperación de Au y Ag y de la EC. En esta investigación las técnicas de Difracción de rayos X, Microscopio Electrónico de Barrido y Espectrometría de Transmisión Mossbauer, fueron utilizadas para caracterizar los productos sólidos formados en los electrodos de hierro y aluminio durante el proceso de EC. Los resultados sugieren que partículas de magnetita y partículas amorfas de hidróxidos de hierro presentes en el proceso de EC recuperan el oro y plata de soluciones de cianuración, en 5 minutos y con una eficiencia mayor al 99%. Éstos resultados fueron obtenidos de soluciones industriales de las compañías mineras Mexicanas del Grupo Minero Bacis, Minera Williams y Minera Avino, de las muestras de las tres compañías, las recuperaciones del oro y plata fueron del 99%.

Palabras clave: Cianuración, Electrocoagulación, recuperación de oro y plata.

1. Introducción

La solubilidad del oro en soluciones de cianuro fue identificada en 1783 por Scheele (Suecia), y fue estudiada en los años 1840-1850 por Elkington & Bagration (Rusia), Elsner (Alemania), y Faraday (Inglaterra). Elkington también tuvo una patente para el uso de soluciones de cianuro de potasio para la galvanoplastia del oro y plata.

La disolución del oro en soluciones aireadas de cianuro y el rol del oxígeno en el mecanismo fueron investigados por Elsner en 1846 y se muestra en la reacción (1):



La ecuación de Elsner que ahora se cree que se aplica directamente a una porción menor del oro durante la disolución, aún es citada en publicaciones actuales de lixiviación del oro. ^[1]

La Figura 1, muestra el proceso convencional de cianuración para la disolución del oro, de acuerdo al proceso Merrill Crowe.

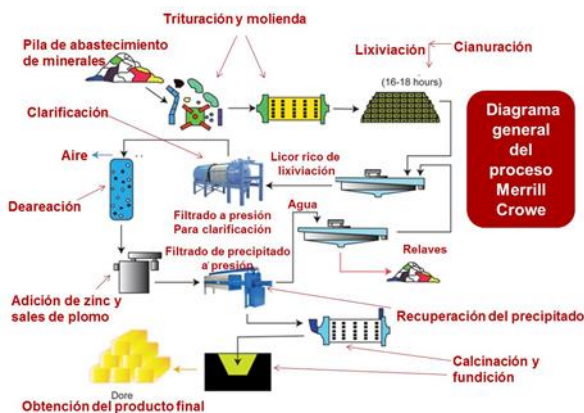


Figura 1. Proceso general de cianuración.

A través del desarrollo de la cianuración, la recuperación de metales preciosos en

soluciones de cianuro recibió mucha atención. Los métodos iniciales de recuperación incluyeron cementación usando polvo de zinc (proyecto MacArthur) y las celdas electrolíticas (proyecto Siemens-Halske & Tainton). La eficiencia de los procesos de la precipitación del zinc fue incrementada por lo siguiente:

- El uso del polvo de zinc en vez de afeitados de zinc en cajas de zinc
- La introducción de la desaereación
- Adición de cantidades pequeñas de sales de plomo soluble antes de la precipitación.

La precipitación del zinc a veces es llamada proceso Merrill-Crowe. Entre 1894 y 1899 el proceso electrolítico Siemens-Halske fue desarrollado e implementado en muchas plantas, particularmente para el tratamiento de soluciones diluidas producidas de la decantación de limos. Un ánodo de hierro y un cátodo de plomo se usaron en un sistema de tanque abierto. En 1915, Boskui introdujo una celda electrolítica alternativa, inventada por Tainton que usaba un tanque cerrado con un ánodo de hierro y una hoja de carbón como cátodo. Aunque estas celdas fueron un éxito tecnológico no eran económicamente viables. No se ha podido obtener un proceso comercial para la electro obtención del oro de soluciones lixiviadas diluidas e impuras de la mina.

Entre los años 1910 y 1930 la flotación fue introducida para el tratamiento de sulfuros de metales básicos, esto rápidamente dio lugar a que el sistema de flotación también fuera usado para sulfatos que contenían oro y concentrados libres de oro. Esto después fue modificado para incluir la flotación de una fracción de arena y obtener un concentrado rico en sulfatos, el cuál se somete a molienda nuevamente y es lixiviado por cianuración, y las colas de la flotación también eran lixiviadas por poco tiempo. Este proceso produjo marginalmente una alta recuperación de oro a muy bajo

costo, para que después las minas de sulfatos se trataran económicamente.

La adsorción de iones de metales preciosos o complejos de soluciones acuosas que se ponían en contacto con carbón activado fue descubierta a principios del siglo XIX. En los años 1890s el carbón activado fue considerado como una ruta alternativa a la cementación de zinc para las plantas de oro de la mina Witwatersrand.^{[2] [3] [5]}

La electrocoagulación (EC), es un fenómeno electroquímico que ha sido conocido por más de 100 años. La EC ha sido previamente empleada para tratar aguas residuales con diferentes grados de éxito.

La EC es un proceso que puede ser considerado como un proceso que acelera la corrosión, donde el óxido verde (green rust o GR por sus siglas en inglés) es un producto intermedio responsable de la remoción de contaminantes (sólidos suspendidos y disueltos, metales, compuestos orgánicos, etc.). Los mecanismos de la electrocoagulación conllevan la oxidación, reducción, descomposición, depositación, coagulación, absorción, adsorción, precipitación y flotación. La EC opera con el principio de hidrolizar los cationes producidos electrolíticamente de los ánodos de hierro y/o aluminio que mejoran la coagulación de los contaminantes en un medio acuoso. Los ánodos de metales de sacrificio son usados continuamente para producir cationes metálicos polivalentes en la vecindad del ánodo. Estos cationes facilitan la coagulación por medio de neutralización de partículas con carga negativa que se dirigen hacia el ánodo por movimiento electroforético tal como se muestra en la Figura No. 2.

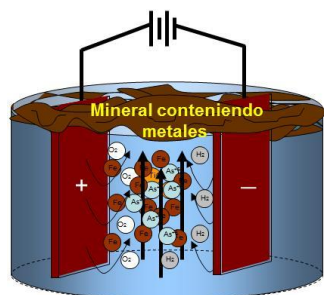


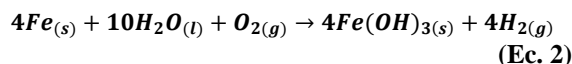
Figura 2. Representación esquemática del proceso de electrocoagulación.

Reacciones involucradas:

Para el caso en el cual el hierro actúa como ánodo, se han propuesto dos mecanismos que explican la formación in situ de dos posibles coagulantes. Estos pueden ser hidróxido ferroso $Fe(OH)_2$ o hidróxido férrico $Fe(OH)_3$. Las reacciones (2) a (5) muestran lo anterior.

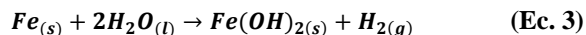
Mecanismo 1: Formación del hidróxido férrico

Reacción global:



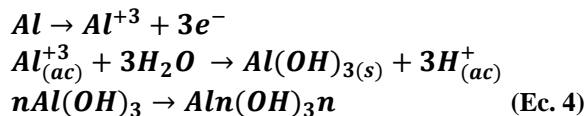
Mecanismo dos: Formación del hidróxido ferroso

Reacción global:

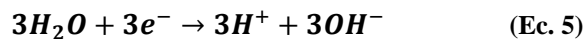


Cuando el aluminio actúa como ánodo las reacciones son las siguientes.

En el ánodo:



En el cátodo:



Factores que influyen en la electrocoagulación

*El voltaje y la corriente aplicada

El suministro de corriente al sistema de EC de acuerdo a la Ley de Faraday determina la cantidad de iones Al^{3+} o Fe^{2+} que son liberados de los electrodos respectivos.

*pH

El pH influye sobre la eficiencia de la corriente en el proceso de solubilidad del metal para formar hidróxido. Se ha observado en diferentes investigaciones que el pH varía durante el proceso de EC y esta variación es dependiente del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar.

El pH durante el proceso puede incrementarse para aguas residuales ácidas, efecto atribuido a la generación de hidrógeno molecular que se origina en el cátodo. En contraposición, en aguas residuales alcalinas el pH puede decrecer y, dependiendo de la naturaleza del contaminante, el pH influye sobre la eficiencia del proceso.

Los compuestos de hierro precipitan dentro de un amplio margen de valores de pH que pueden ser tan bajos como un pH de 3.8 o arriba de 8.0.

*Densidad de corriente

Como las variables eléctricas en el proceso de EC son los parámetros que más influyen en la remoción de metales y están ligados a factores económicos, se debe prestar mayor atención a su estudio. El suministro de corriente al sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones de aluminio Al^{+3} o Fe^{+2} , liberados por los respectivos electrodos.

*Conductividad

Un incremento en la conductividad eléctrica genera a su vez un incremento en la densidad de corriente. Cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de

electrocoagulación y adicionalmente el incremento de la conductividad, manteniendo la densidad de corriente constante, se produce una disminución del voltaje aplicado.

*Temperatura

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

*Tiempo de residencia

El tiempo de residencia también afectara la cantidad de agentes coagulantes liberados, pero para propósitos prácticos debe ser minimizado. [2] [6]

Se tiene como antecedente estudios hechos por (Parga et al 2011) [6], utilizando una solución acuosa de cianuro con concentraciones de oro y plata en la solución rica de 13.25 ppm y 1357 ppm respectivamente, utilizando electrodos de hierro, con un pH inicial de 8. La Tabla 1, plasma los resultados obtenidos, y se puede observar que al aplicar el proceso de EC, la concentración en la fase líquida obtenida y analizada mediante espectrofotometría de absorción atómica, la concentración de los metales de estudio, va disminuyendo conforme al tiempo de retención, logrando en solo 5 minutos disminuir la concentración de oro a 0.1 ppm y 0.9 ppm de plata. La Figura 4, muestra el gráfico correspondiente al % de recuperación de oro y plata. [6]

Tabla 1. Concentración de metales vs tiempo.

Elementos	Tiempo (min)	[Au] ppm	[Ag] ppm	Variación de pH
Au/Ag	0	13.25	1357	8
Au/Ag	1	12.5	1240	9.2
Au/Ag	2	10.5	219.5	9.5
Au/Ag	3	1	9	10.7
Au/Ag	4	0.5	7	11.2
Au/Ag	5	0.1	0.9	11.5

Fuente: (Parga et al 2011). [6]

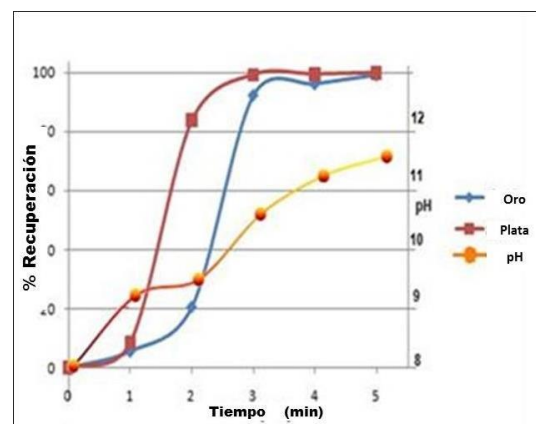


Figura 4. % de recuperación de Au y Ag vs tiempo de EC. Fuente: (Parga et al 2011). [6]

En cuanto a la caracterización de la fase sólida, la cual contiene los sólidos removidos por el proceso de electrocoagulación, la figura 5, muestra el difractograma por Rayos X, donde C, representa $\text{Cu}_2\text{Fe}(\text{CN})_{62}\text{H}_2\text{O}$; Ag, Plata; M, Magnetita y L, Lepidocrocita. [6]

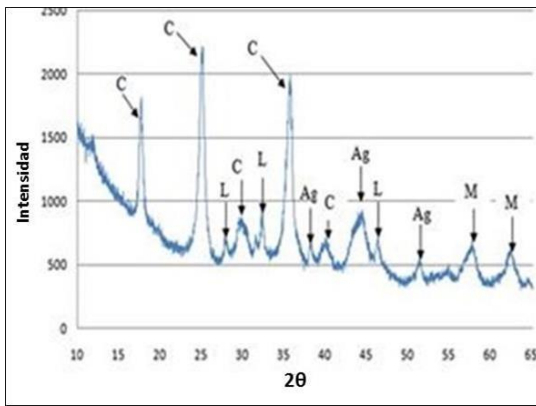


Figura 5. Análisis del sólido por difracción de Rayos X. Fuente: (Parga et al 2011).^[6]

La Figura 6, representa el análisis obtenido mediante el microscopio electrónico de barrido (SEM/EDAX), de los sólidos obtenidos.

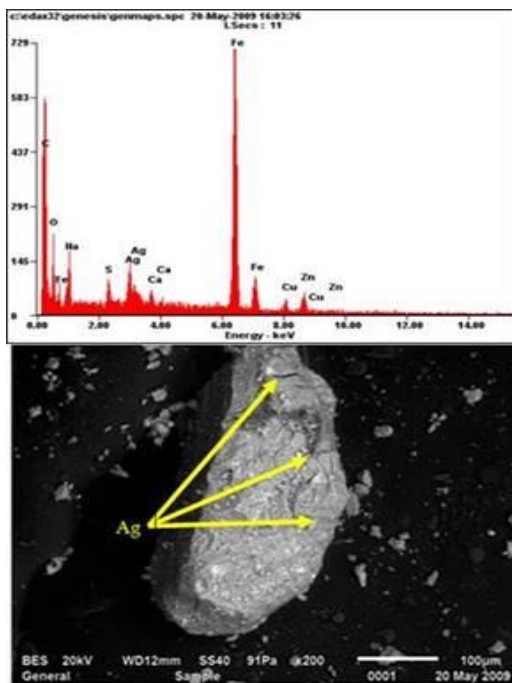


Figura 6. Análisis de partículas sólidas en SEM. Fuente: (Parga et al 2011).^[6]

La presente investigación se enfoca en la aplicación de la EC a soluciones acuosas de cianuro proporcionadas por diversas Compañías Mineras, para determinar las mejores condiciones de tratamiento que permitan remover el oro y la plata. Comprobándose los resultados con la

caracterización de los productos, tanto sólidos como líquidos por diversas técnicas de análisis, como microscopio electrónico de barrido, fundición y espectrofotometría.

2. Metodología

2.1 Arreglo experimental

Se hizo uso de parrillas de agitación magnéticas marca Sarget y Thermoline Cimarec 2 y barra magnética de 3 cm., fuente de poder de corriente directa marca Kaselco, con capacidad máxima de 50 V y 10 A, pH metros marca Brand WR scientific modelo 8005 y Hanna Instruments Modelo HI 255, embudos de separación, vasos de precipitado de 1000, 400 y 250 mL, papel filtro Whatman No. 40, Ácido Clorhídrico y Ácido Sulfúrico grado reactivo y soluciones estándar para calibración de pHmetro con valores de 4, 7 y 10 marca J.T. Baker. Las dimensiones de los electrodos de hierro y aluminio fueron de 3 cm x 6 cm x 0.2 cm. El arreglo experimental se presenta en la Figura 3.

2.2 Experimentos de electrocoagulación

Se trabajó con soluciones industriales de las compañías mineras Mexicanas del Grupo Minero Bacis, Minera Williams y Minera Avino, las cuales contienen diferentes concentraciones de oro y plata en las soluciones ricas producidas en el proceso de cianuración.



Figura 3. Arreglo experimental.

El volumen inicial de muestra fue de 100 mL, acondicionado a diversos valores de pH entre 6 y 9 y utilizando HCl y H₂SO₄ como reactivos acidificantes, el voltaje aplicado fue de 5 a 10 VCD, proporcionando una intensidad de corriente eléctrica entre 2 y 10 Amperes, tiempo de residencia entre 5 y 10 minutos, con agitación magnética y utilizando electrodos de hierro y aluminio con una separación entre electrodos de 2 cm.

Las soluciones postelectrocoagulación fueron filtradas utilizando papel filtro Whatman grado 40 (diámetro de poro de 8 µm). El sólido retenido fue posteriormente caracterizado mediante técnicas de Difracción de Rayos X, Microscopio Electrónico de Barrido y Espectrometría de Transmisión Mossbauer, así como por técnica de fundición para la cuantificación de oro y plata.

2.2.1 Primera prueba

La primera solución muestra reportando concentraciones iniciales de oro y plata de 1.94 ppm y 66.55 ppm respectivamente, fue sometida al proceso de EC, utilizando electrodos de hierro o de aluminio, así como una combinación de los mismos, además HCl y H₂SO₄ como reactivos acidificantes

para ajustar a valores de pH de 7, 7.3, 8, 8.5, 9 y 9.5.

2.2.2 Segunda prueba

La caracterización de la segunda muestra reporta las concentraciones más altas de metales preciosos, con una concentración de 63.5 g/Ton de oro y 336.35 g/Ton de plata. Se aplica la misma metodología, acondicionando la solución a valores de pH de 6, 7, 8 y 9, utilizando electrodos de hierro y aluminio y una distancia entre electrodos de 2 cm.

2.2.3 Tercera prueba

Al analizar los resultados obtenidos en el segundo arreglo experimental, se decide trabajar con los parámetros que proporcionaron los mejores porcentajes de remoción, que fueron utilizando electrodos de aluminio, HCl como reactivo acidificante y valores de pH entre 7 y 8.

Se inicia con un volumen de 400 mL, aplicando tres etapas de EC, con tiempo de residencia de 10 minutos cada una y disminuyendo la distancia entre electrodos a 0.8 cm.

3. Resultados

En la primera prueba, la muestra industrial tratada, cuyas concentraciones iniciales de oro y plata fueron 1.94 ppm y 66.55 ppm respectivamente, es sometida al proceso de EC, utilizando electrodos de hierro, aluminio, así como una combinación de los mismos. La Figura 7, muestra algunas fases del proceso de EC.

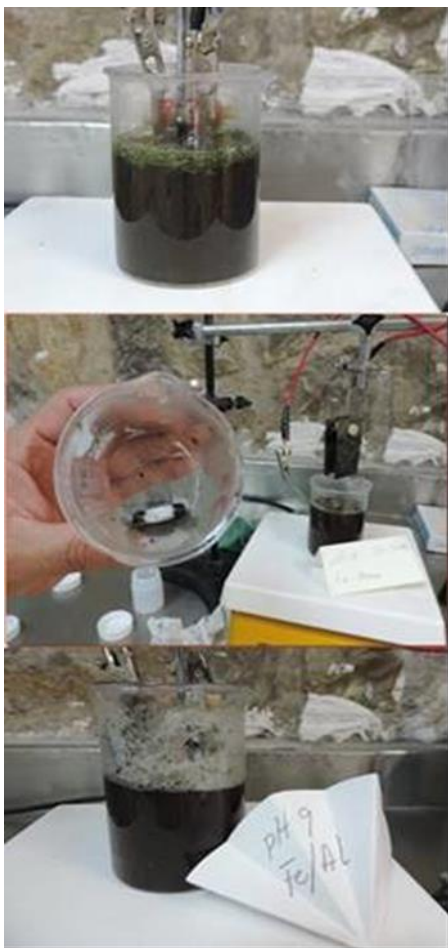


Figura 7. Diversas etapas del proceso de EC en la primera prueba experimental.

Los porcentajes de remoción obtenidos se plasman en la Tabla 2.

Tabla 2. Porcentajes de remoción en la primera prueba experimental.

MUESTRA No 2	mg/l		% Remoción	
	Au	Ag	Au	Ag
INICIAL pH = 12.5	1.94	66.55		
Electrodo de Hierro				
pH = 7.3	1.06	4.20	45.36	93.69
pH = 8	1.14	3.36	41.24	94.95
pH = 9	1.19	7.02	38.66	89.45
pH = 7	1.43	3.23	26.29	95.15
pH = 8.5	1.45	2.51	25.26	96.23
pH = 9.5	1.24	1.87	36.08	97.19
Electrodo Al				
pH = 7	0.78	1.60	59.79	97.60
pH = 8	0.48	1.57	75.26	97.64
pH = 9	0.31	2.28	84.02	96.57
Combinación de electrodos Fe/Al				
pH = 7	0.42	3.23	78.35	95.15
pH = 9	0.41	1.62	78.87	97.57
pH = 8	0.43	2.59	77.84	96.11

Los sólidos obtenidos se analizan por técnica EDX en microscopio electrónico de barrido. Los resultados reportados como % en peso, en función de material del electrodo y pH de la solución, se plasman en la Tabla 3.

Respecto a la segunda prueba, cuya muestra, reporta las concentraciones más altas de oro y plata, se trabaja acondicionando las soluciones a pH de 6, 7, 8 y 9, tanto con HCl como con H₂SO₄.

Tabla 3. Resultados de las partículas sólidas de la primera prueba experimental, por EDX.

[% Peso]	electrodo de Fe					electrodo Fe/Al			electrodo Al		
	pH										
	7.00	7.30	8.00	8.50	9.00	7.00	8.00	9.00	7.00	8.00	9.00
Ag	0.03	0.16	1.43	0.16	0.54	0.43	1.97	0.59	0.23	0.18	0.42
Au	0.10	0.09	0.26	0.20	0.21	0.01	0.53	0.24	0.15	0.13	0.46

Al aplicar el proceso de EC, las muestras tratadas con electrodos de hierro, producen ferrocianuro (azul de Prusia), como se observa en la Figura 8, así mismo la Figura 9, presenta la imagen correspondiente al ser tratada con electrodos de aluminio.

La caracterización de la fase líquida se plasma en la Tabla 4 y la caracterización de la fase sólida se realiza con microscopio electrónico de barrido, reportando concentraciones en % en peso de oro superiores a 2.5 y hasta 29.52 de plata. La Figura 10, muestra la microfotografía y espectrograma generado en una partícula de esta prueba experimental.

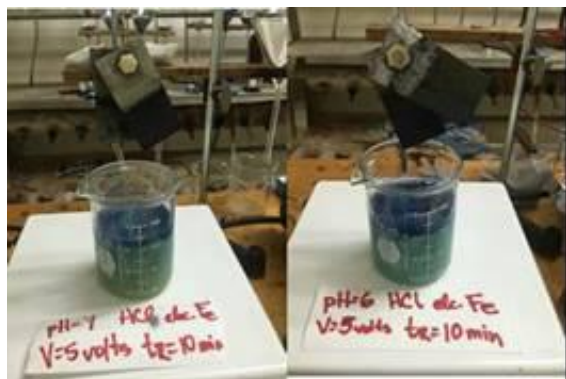


Figura 8. Ferrocianuro (Azul de Prusia) desarrollado al trabajar con electrodos de Fe.



Figura 9. Vista de la segunda prueba, utilizando electrodos de Al.

En base a los resultados obtenidos se decide trabajar con los parámetros que proporcionaron los mejores porcentajes de remoción. Utilizando electrodos de aluminio, HCl como reactivo acidificante y valores de pH entre 7 y 8.

Se procede a correr una tercera prueba, aplicando tres etapas de EC, con tiempo de residencia de 10 minutos cada una y disminuyendo la distancia entre electrodos a 0.8 cm, y con dos réplicas.

La primera etapa se hizo con un volumen inicial de 400 mL de muestra, a la cual se le aplica el proceso de EC con los parámetros indicados, y una vez filtrado.

Tabla 4. Porcentajes de remoción en segunda prueba experimental.

Electrodo de Hierro				
Elemento	Porcentaje de remoción			
	pH			
	6	7	8	9
Au	47.34	40.78	31.65	29.69
Ag	55.63	48.31	32.94	30.52
Electrodo de Aluminio				
Elemento	Porcentaje de remoción			
	pH			
	6	7	8	9
Au	51.72	55.16	42.91	29.69
Ag	61.61	71.7	52.91	30.42

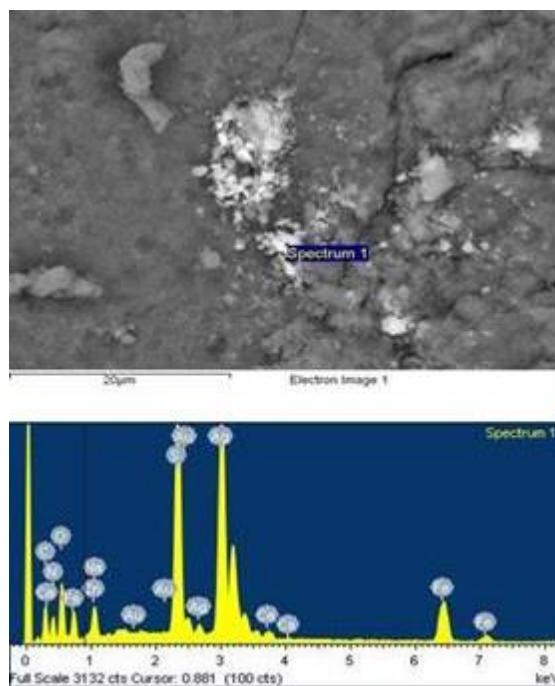


Figura 10. Micrografía y espectrograma de partícula del segundo arreglo experimental.

La segunda etapa consiste en tomar 300 mL de dicho filtrado y se aplica nuevamente el proceso de EC. De igual forma la tercera etapa se trabajó con 200 mL de la solución filtrada de la segunda etapa.

La fase líquida de cada una de las etapas se caracteriza para comprobar el porcentaje de remoción de oro y plata en cada una de ellas.

Los resultados obtenidos con solución de pH 7, se muestran en la Tabla 5, y los de pH 8 en la Tabla 6.

Tabla 5. Porcentajes de remoción de oro y plata en tres etapas de EC, pH 7.

pH=7	Au (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
	SOL. INICIAL	ETAPA 3			
SOL. INICIAL	64.70	66.30	65.5		
ETAPA 1	48.40	50.20	49.3	24.73	24.73
ETAPA 2	27.90	35.60	31.75	35.60	51.53
ETAPA 3	2.50	0.20	1.35	95.75	97.94
pH=7	Ag (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
	SOL. INICIAL	ETAPA 3			
SOL. INICIAL	513.30	524.70	519		
ETAPA 1	304.60	340.80	322.7	37.82	37.82
ETAPA 2	141.00	148.60	144.8	55.13	72.10
ETAPA 3	2.50	8.41	5.455	96.23	98.95

La fase sólida de cada etapa se conjunta y es caracterizada por microscopio electrónico de barrido. Las figuras 11 y 12, muestran las microfotografías y espectrogramas correspondientes, con concentraciones de oro de 14.6, y de 51.31% en peso de plata. La Figura 13, plasma el mapeo realizado a una partícula sólida conteniendo alta concentración de plata.

Tabla 6. % de remoción de A y Ag en tres etapas de EC con pH 8.

pH=8	Au (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
	SOL. INICIAL	ETAPA 3			
SOL. INICIAL	64.70	66.30	65.5		
ETAPA 1	50.90	52.00	51.45	21.45	21.45
ETAPA 2	26.00	35.60	30.8	40.14	52.98
ETAPA 3	1.29	0.20	0.745	97.58	98.86
pH=8	Ag (gr/ton)		CONCENT. PROMEDIO	% REMOCION POR ETAPAS	% REMOCION TOTAL
	SOLUCION I	ETAPA 3			
SOLUCION I	513.30	524.70	519		
ETAPA 1	360.10	375.00	367.55	29.18	29.18
ETAPA 2	202.00	198.40	200.2	45.53	61.43
ETAPA 3	7.71	8.80	8.255	95.88	98.41

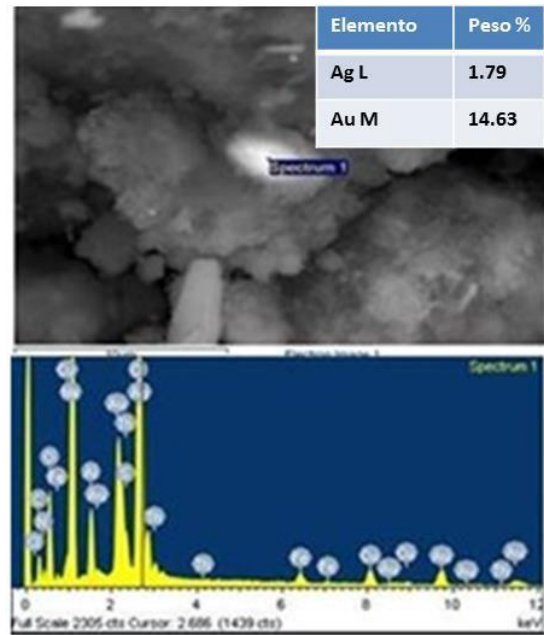


Figura 11. Micrografía y espectrograma de la tercera prueba experimental.

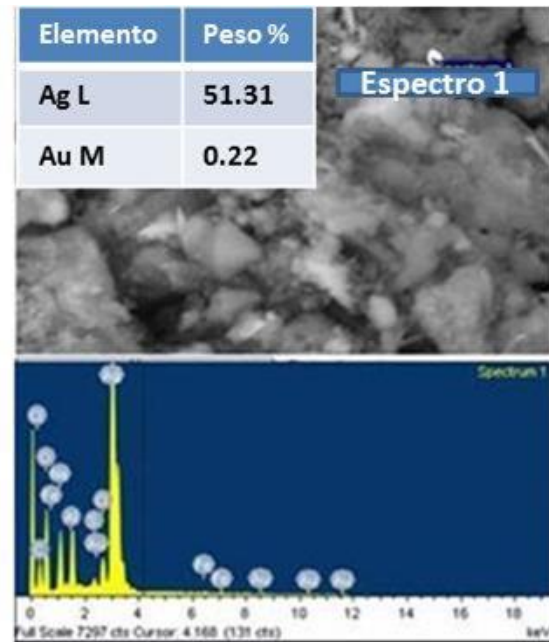


Figura 12. Micrografía y espectrograma de tercera prueba experimental.

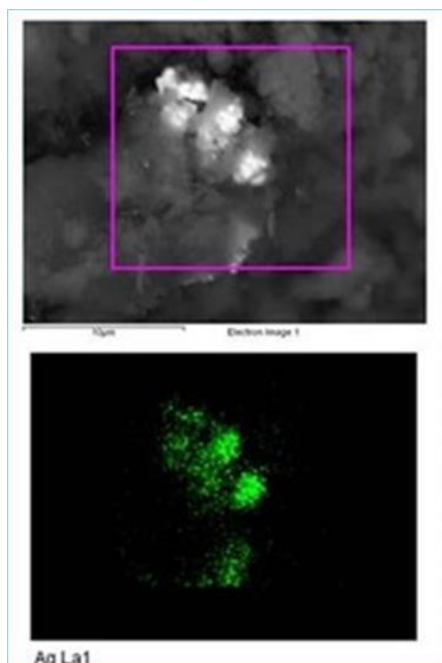


Figura 13. Mapeo realizado por EDX a partícula con alto contenido de plata.

Para corroborar resultados se enviaron 5 gr de la fase sólida a dos laboratorios para analizarla por técnica de fundición obteniéndose resultados similares.

La concentración promedio fue de 1,464.5 gr/Ton de oro y 12,590.5 gr/Ton de plata para pH de 7, y de 1589.5 gr/Ton de oro y 13,340.5 gr/Ton de plata para pH de 8, (Tabla 7). La recuperación de los metales preciosos es muy favorable cuando se someten las muestras a las condiciones de la tercera prueba experimental.

Tabla 7. Concentraciones de oro y plata por técnica de fundición para la tercera prueba experimental.

pH	No. Muestra	[Ag] gr/Ton	[Au] gr/Ton
7	A7	12482.0	1478.0
8	A8	12985.0	1555.0
7	A9	12699.0	1451.0
8	A10	13696.0	1624.0

4. Discusión

Las técnicas de Difracción por Rayos X y Microscopio electrónico de barrido,

comprobaron que las especies formadas son de tipo magnético, como lepidocrocita y magnetita, las cuales absorben partículas de oro y plata en su superficie, debido a la atracción electrostática entre ambos metales.

Los resultados obtenidos en la primera prueba experimental muestran que el tratamiento con mayor remoción de oro y plata y que no introduce fierro a la solución es en el que se utilizan electrodos de aluminio. Además de que se obtienen porcentajes de remoción prácticamente constantes a diversos valores de pH. Lográndose el mejor valor con un pH de 8.

En relación al segundo arreglo experimental, cuando se utilizaron electrodos de fierro se coloreo la solución por la formación del ferrocianuro azul de Prusia, el cual contamina la muestra y podría dificultar el tratamiento al efluente final. Los mejores resultados (55 - 62 % de remoción) se logran al trabajar con pH de 6 y 7 y electrodos de aluminio.

De acuerdo a los resultados de la segunda prueba, se decidió trabajar con los parámetros que proporcionaron los mejores resultados. Al aplicar el proceso de EC en tres etapas a muestras acondicionadas a valores de pH de 7 y 8, distancia entre electrodos de 0.8 cm y con dos replicas, se alcanzan porcentajes de remoción para oro y plata de aproximadamente 99%, lo cual se comprobó con el análisis por técnica de fundición a los sólidos obtenidos, los cuales arrojaron valores de 13,696 gr/Ton de plata y 1624 gr/Ton de oro, al igual que al ser analizados en el microscopio electrónico de barrido se lograron obtener mapeos a partículas sólidas con alta concentración de metales preciosos.

Los resultados indican que, para las muestras industriales utilizadas en el presente estudio, los hidróxidos de aluminio funcionan mejor que los de fierro para la adsorción de oro y plata.

5. Conclusiones

El proceso de electrocoagulación, mostró excelentes resultados en soluciones con bajas concentraciones iniciales de oro y plata, obteniendo hasta un 97 % de remoción en una sola etapa utilizando electrodos de fierro, con la consecuente formación de especies magnéticas y hasta un 99 % en soluciones con altas concentraciones aplicándola en tres etapas y utilizando electrodos de aluminio.

Los resultados de este estudio indican que el oro y la plata pueden ser exitosamente adsorbidos en especies de hierro por procesos de electrocoagulación (97.19 %). Sin embargo, con electrodos de Al, la remoción fue de hasta 99.5 % para el oro y la plata. Los % de remoción fueron notablemente incrementados aplicando la EC en tres etapas.

La recuperación de oro y plata por electrocoagulación, demostró ser menos complicada comparada con otras técnicas y muy promisorias para la recuperación de metales preciosos; no necesita reactivos químicos, y podría ser una técnica ecológicamente viable.

Se recomienda seguir investigando y probando diversas condiciones experimentales que permitan verificar la reproductibilidad de los resultados a nivel industrial.

6. Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México, al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PRODEP), así como al Instituto Tecnológico de Saltillo y al Instituto Tecnológico de la Laguna, que sin su apoyo no hubiera sido posible realizar las pruebas experimentales, los análisis necesarios, así como la elaboración del presente artículo.

7. Referencias

- [1] John O. Marsden and C. Iain House, (2006). *The Chemistry of Gold Extraction, Littleton, Colorado, USA*, Editorial SME (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., Segunda Edición.
- [2] J.R. Parga, M. Rodríguez, V. Vázquez, J.L. Valenzuela & H. Moreno, “Recovery of Silver and Gold from Cyanide Solution by Magnetic Species Formed in the Electrocoagulation Process”, *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, Publisher: Taylor & Francis, Vol. 33, 2012, 363-373.
- [3] Habashi, F., (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy, Vol. III, Precious metals, refractory metals, scattered metals, radioactive metals, rare earth metals*. Federal Republic of Germany: WILEY-VCH.
- [4] Adams, M., (2016). *Advances in Gold Ore Processing, Developments in Mineral Processing, Vol. 15*. Amsterdam, The Netherlands: ELSEVIER B. V.
- [5] Marsden, J. & House, C., (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. Second Edition. Littleton, Colorado, USA: Society for Mining, and Exploration, Inc. (SME).
- [6] José R. Parga, Jesus L. Valenzuela, Victor Vázquez. “Analysis of the adsorption of gold and silver on magnetic species formed in the electrocoagulation process”. TMS 2011 140th Annual Meeting & Exhibition; Supplemental Proceedings, Volume 1. Materials Processing and Energy Materials; pag. 267-274.