

RECUPERACIÓN DE COMPLEJOS AUROCIANURADOS POR ELUCIÓN
ELECTROQUÍMICA DE CARBÓN ACTIVADO

ESTEFANNYA CARVAJAL CRUZ
ANGELA VICTORIA ELVIRA MARULANDA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI

2016

RECUPERACIÓN DE COMPLEJOS AUROCIANURADOS POR ELUCIÓN
ELECTROQUÍMICA DE CARBÓN ACTIVADO

ESTEFANNYA CARVAJAL CRUZ
ANGELA VICTORIA ELVIRA MARULANDA

PROYECTO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO

Director del proyecto:
CHRISTIAN EDUARDO ÁLVAREZ PUGLIESE
Ingeniero Químico

Co-director del proyecto:
NILSON MARRIAGA CABRALES
Ph.D M.Sc en Ingeniería Química

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI

2016

DEDICATORIA

A Dios por su fortaleza...

A mis padres Raúl y Marina por su amor incondicional...

A mis hermanos Johanna, Jorge y Carlos por apoyarme y creer en mí...

Y a mí cuñado Francisco por sus consejos...

Estefannya

Agradezco a Dios por la vida y por permitirme alcanzar este gran logro...

A mis padres, por su amor, sus enseñanzas, sus consejos y su apoyo incondicional...

A mi hermano y a mi abuela por brindarme su amor y su apoyo...

A Gustavo por su amor, su paciencia y sus palabras de aliento...

Angela

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen de manera especial a su director el Ingeniero Christian Álvarez Pugliese, por su interés constante y apoyo en el proyecto y a su co-director Nilson Marriaga. Ph.D, por resolver todas las dudas, su disponibilidad, ayuda y colaboración en todas las fases del presente trabajo.

Agradecen también a Gloria Lasso, directora del Laboratorio de Servicios de la Escuela de Ingeniería Química, por su disposición y confianza.

Además al ingeniero Wilmar David Montenegro por su gran cooperación en la preparación de la materia prima y en general durante toda la parte experimental, y al Servicio Geológico Colombiano SGC por el apoyo recibido para la realización de los análisis químicos y el uso de sus instalaciones.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	9
1. MARCO TEÓRICO	11
1.1 ANTECEDENTES	11
1.2 MARCO CONCEPTUAL	12
1.2.1 Cianuración del oro	12
1.2.2 Adsorción de oro en CAG	12
1.2.3 Procesos Actuales de Elución: Zadra y AARL.	13
1.2.4 Elución electroquímica	13
1.2.5 Electrodeposición de Au.....	14
2. METODOLOGÍA.....	16
2.1 MATERIALES.....	16
2.2 EQUIPOS	17
2.3 VARIABLES DE RESPUESTA	18
2.3.1 Desorción.....	18
2.3.2 Porcentaje de regeneración.....	19
2.4 PROCEDIMIENTOS	19
2.4.1 Purificación del Oro.....	19
2.4.2 Preparación de la solución aurocianurada.	19
2.4.3 Adsorción de los CAu en el CAG	20
2.4.4 Ensayos Preliminares.....	20
2.4.5 Arreglo inicial de los electrodos	20
2.4.6 Modificación del arreglo de los electrodos.....	21
2.4.7 Regeneración catódica.....	21
2.4.8 Ensayos Finales.	22
2.4.9 Ciclo adsorción – desorción – adsorción (ADA).....	22

2.5	ANÁLISIS QUÍMICO	23
2.5.1	Ensayo al fuego.	23
2.5.2	Espectroscopia de Absorción Atómica.....	24
2.6	DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	26
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	27
3.1	ADSORCIÓN DE CAu EN CAG	27
3.2	ELUCIÓN ELECTROQUÍMICA DE COMPLEJOS AUROCIANURADOS	28
3.2.1	Pruebas Preliminares	28
3.2.2	Pruebas finales.....	31
3.2.3	Adsorción inicial en el Ciclo Adsorción – Desorción – Adsorción (ADA).	32
3.2.4	Desorción en el Ciclo Adsorción – Desorción – Adsorción (ADA).	33
3.2.5	Adsorción posterior a la desorción en el Ciclo Adsorción – Desorción – Adsorción (ADA).....	35
3.2.6	Diagrama de bloques de resultados	37
3.2.7	Consumo energético específico.....	38
3.2.8	Eficiencia de corriente.....	38
3.2.9	Eficiencia de electrodeposición.....	40
3.2.10	Comparación de porcentajes de desorción por carga específica. Los	41
4.	CONCLUSIONES.....	42
5.	BIBLIOGRAFÍA	43

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Electrodo utilizado para las pruebas experimentales. 1A. Ánodo de Titanio. 1B. Cátodo de Acero inoxidable.....	17
Figura 2. Celda Electrolítica con configuración inicial de electrodos.....	18
Figura 3. (A) Celda Electrolítica Modificada con separador de Acrílico perforado. (B) Celda Modificada para Regeneración Catódica. (C) Celda Modificada para Regeneración Anódica. ...	21
Figura 4. Desorción de CAu del ciclo ADA. Configuración de celda con recirculación de electrolito soporte	23
Figura 5. Curva de adsorción inicial de Au en CAG. Condiciones: T: 25°C.....	27
Figura 6. Efecto del tiempo de elución en la desorción (%) de CAu. Condiciones: Densidad de corriente 24 mA/cm ² , NaOH 2%p/v, 2.5 g CAG, T.25°C.....	29
Figura 7. Efecto de la densidad de corriente (j) y del tipo de electrolito soporte sobre el porcentaje de desorción de CAu. Condiciones: concentración 2% p/v, T. 25°C, 2.5 g CAG	30
Figura 8. Efecto de la concentración del electrolito soporte sobre la desorción de CAu. Condiciones: densidad de corriente 24 mA/cm ² , NaOH, 4 horas de elución, 2.5 g CAG, T.25°C.	32
Figura 9. Porcentajes de desorción y regeneración en ciclo ADA. Densidad de corriente 24mA/cm ² , 4 horas de elución, NaOH 2% p/v, 2.5 g CAG, T.25°C.....	34
Figura 10. Curva de adsorción del Au en CAG para el ciclo ADA, posterior a la desorción. Condiciones: T.25°C	35
Figura 11. Porcentajes de adsorción de Au en CAG para la Adsorción Inicial y posterior a la desorción en el ciclo ADA.....	36
Figura 12. Au electrodepositado en el cátodo después del ciclo ADA.	40

RESUMEN

En esta investigación se estudió una técnica de elución electroquímica de carbón activado cargado con oro, usando una celda de acrílico transparente con un cátodo de acero inoxidable AISI 314, un ánodo DSA de titanio y un separador acrílico, y se trabajó con regeneración catódica (El carbón activado granular (CAG) se ubicó entre el separador acrílico y el cátodo). Se realizaron pruebas preliminares donde se varió la densidad de corriente j (12 y 24 mA/cm²), tiempo de elución (4 y 8 horas), y electrolito soporte (NaOH y NaOH+Na₂SO₄) con una concentración del 2% p/v. Los ensayos finales se realizaron a 24 mA/cm², 4 horas de elución y con NaOH como electrolito soporte, ya que a estas condiciones se obtuvo el mayor porcentaje de desorción (32%) en las pruebas preliminares. Se varió la concentración de electrolito (2% y 5% p/v).

Finalmente se realizaron dos ciclos de adsorción-desorción-adsorción (ADA) usando dos configuraciones de celda; la configuración establecida para los ensayos preliminares y finales (configuración con agitación) y, la configuración de celda con recirculación de electrolito soporte. La desorción se trabajó a 24 mA/cm², 4 horas y NaOH al 2% p/v como electrolito soporte, concentración que arrojó el mayor porcentaje de desorción (33%) en los ensayos finales. Los porcentajes de desorción y regeneración obtenidos en el ciclo ADA fueron de 34% y 29% para la configuración de celda con agitación, y de 58% y 49% para la celda con recirculación, respectivamente.

Palabras clave:

Electroquímica, desorción, CAG, Complejo aurocianurado, elución, regeneración catódica, solución aurocianurada.

INTRODUCCIÓN

La minería aurífera en Colombia está tomando cada vez más importancia en la economía del país, desde la priorización de esta industria y la designación como una de las “locomotoras de desarrollo”. Sin embargo, la extracción de oro con técnicas y tecnologías no apropiadas está causando que esta actividad se vuelva insostenible debido a los impactos ambientales negativos que acarrea, especialmente por el uso de sustancias tóxicas como el mercurio, cuya utilización inadecuada conduce a altas pérdidas, tanto en forma de mercurio elemental durante el beneficio del oro, como en forma de vapor de mercurio y compuestos inorgánicos durante la separación de este con el oro. Así mismo, el uso no controlado de cianuro puede generar efectos negativos sobre las comunidades hidrobiológicas, especialmente el envenenamiento de peces, y también la contaminación de fuentes de agua que en muchos casos son destinadas al uso humano (Morelli & Garay, 2013).

En el proceso minero a gran escala, el oro se disuelve en solución como iones $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. Esta solución se adsorbe sobre carbón activado granular (CAG) por medio de procesos como el CIP (*Carbon in Pulp*), CIL (*Carbon in Leach*) y CIC (*Carbon in Column*), dependiendo del tipo de mineral que se esté procesando. Posterior a la adsorción de los complejos aurocianurados (CAu) se realiza la elución de éstos por medio de procesos térmicos, principalmente el proceso Zadra y el proceso del Laboratorio de Investigación Anglo Americano - AARL (*The Anglo American Research Laboratory method*). Ambos procesos son efectivos en la extracción de oro de las soluciones, sin embargo, los consumos energéticos y tiempos de retención son altos (6-72 horas) al igual que los costos de capital, que limitan su aplicación sólo a la minería de gran escala. Actualmente, las investigaciones se concentran en la búsqueda de técnicas más eficientes que puedan reemplazar los procesos tradicionales, como la elución ultrasónica (Feng, Tan, & van Deventer, 2003), elución con solventes (Soleimani & Kaghazchi, 2008), entre otras.

Se han reportado estudios de elución electroquímica para compuestos orgánicos (Narbaitz & Cen, 1994) (Wang & Balasubramanian, 2009) (Sun, Liu, Wang, & Li, 2013), los cuales han arrojado

resultados prometedores, pero las investigaciones realizadas para desorber oro mediante esta técnica son escasas (Martins, 1993) (Breguncci, Ribeiro, & Martins, 2001). El propósito de este proyecto fue determinar la factibilidad de la elución electroquímica de carbón activado cargado con oro, mediante el estudio del efecto del tipo de regeneración (anódica, catódica, no dividida), tiempo de elución, densidad de corriente, tipo de electrolito (NaOH y Na₂SO₄) y concentración del mismo (2% p/v y 5 % p/v), sobre el porcentaje de desorción.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES

Las técnicas más comunes para la regeneración de carbón activado granular (CAG) en el sector minero son el proceso ZADRA y el proceso AARL (The Anglo American Research Laboratory). A pesar de que estos procesos son efectivos en la recuperación de CAu en carbón activado ambos requieren de grandes consumos energéticos, tienen altos costos de operación y mantenimiento y usan grandes cantidades de sustancias altamente contaminantes como el cianuro de sodio (NaCN) (Soleimani & Kaghazchi, 2008).

Otros métodos de recuperación de oro en carbón activado han sido estudiados, entre los cuales se encuentra el ultrasonido y agua desionizada. La elución con ultrasonido se hace a condiciones menos severas comparadas con los procesos de regeneración térmica, pero los porcentajes de recuperación son menores (60-70%). (Weng & Hsu, 2008).

Por su parte, la elución de oro con agua desionizada requiere de temperaturas y tiempos de elución menores que el proceso ZADRA, pero siguen siendo significativamente altos (90°C y 14 h), además, para obtener un porcentaje de 100% de recuperación es necesario realizar tratamiento con cianuro e hidróxido de sodio (Davidson & Duncanson, 1977).

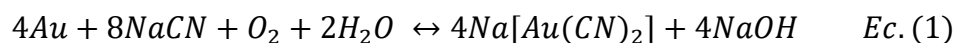
El método electroquímico ha sido estudiado para la elución de resinas poliméricas cargadas con oro (Martins, 1993) (Breguncci et al., 2001). Martins logró un porcentaje máximo de desorción del 80%, trabajando a 1.3 mA/cm², con una solución electrolítica de NaCN y NaOH durante 200 horas de elución. Por su parte Breguncci obtuvo una recuperación máxima del 16.5% de oro, a las condiciones de 0.2 mA/cm², 6 horas de elución, y una solución electrolítica de NaOH y NaCN.

La elución electroquímica también se ha estudiado para compuestos orgánicos en CAG. Los primeros estudios de tratamiento electroquímicos comenzaron en 1994, en ellos se investigó la viabilidad de la regeneración electroquímica de un CAG cargado con fenol. La máxima eficiencia

de regeneración fue de 95%, en donde se encontró que la densidad de corriente y el tiempo de tratamiento influyen significativamente, como también el tipo y concentración de electrolito y el tamaño de partícula del CAG. El carbón activado que se regeneró, se cargó nuevamente con fenol y la eficiencia de regeneración solo disminuyó en un 2% por cada ciclo de adsorción-desorción (Narbaitz & Cen, 1994).

1.2 MARCO CONCEPTUAL

1.2.1 Cianuración del oro. La disolución de oro por acción del cianuro se rige por la reacción de Elsner (Ec. 1). Esta reacción de naturaleza electroquímica, muestra que el oro se oxida en soluciones cianuradas alcalinas para formar el complejo aurocianurado en presencia de oxígeno (Marsden & House, 2006).



Algunas variables que afectan el proceso de cianuración son la concentración de Cianuro, pH y cantidad de oxígeno.

1.2.2 Adsorción de oro en CAG. El oro se adsorbe sobre el carbón activado como el par iónico $Na[Au(CN)_2]$. La tasa inicial de adsorción del complejo aurocianurado es rápida y se lleva a cabo en los sitios más activos de los macroporos y posiblemente de los mesoporos, sin embargo la cinética decrece a medida que se acerca al equilibrio, ya que requiere la difusión de las especies de aurocianuro a través de los microporos, siendo un proceso más lento debido a que el área de sección transversal del poro es menor o igual a la del complejo aurocianurado (Fleming & Nicol, 1984).

Algunos factores que afectan la adsorción de oro son:

- Eficiencia de mezclado: la tasa de adsorción es dependiente de la difusión en la capa limítrofe sólido-líquido. En consecuencia el grado de mezclado del carbón en una solución debe mantener la mezcla lo más homogénea posible y maximizar el transporte

másico de las especies de aurocianuro hacia la superficie del carbón.

- **Concentración de Oro en la Solución:** La tasa de adsorción de oro y el equilibrio de la capacidad de cargado se ven incrementadas con el aumento de la cantidad de oro en la solución.
- **Concentración de Cianuro:** al aumentar la concentración de cianuro la capacidad de carga del carbón decrece, por la elevada competencia de las especies de cianuro libre por los sitios activos del carbón (Rees, 2000).

1.2.3 Procesos Actuales de Elución: Zadra y AARL. Las técnicas comercialmente más usadas para la elución del oro adsorbido en el proceso CIP, son los tratamientos de regeneración térmica Zadra y AARL (Anglo American Research Laboratory). En el proceso de elución Zadra se recircula una solución caliente de NaOH al 1% y de NaCN al 0.2% por el carbón activado con el oro adsorbido durante 72 horas a 95-100°C y 1 atm para desorber el ion aurocianuro $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. Con el fin de reducir el tiempo de elución a 12 horas se han realizado modificaciones como el aumento de presión (600 kPa) y el aumento de temperatura a 140° C (Soleimani & Kaghazchi, 2008).

En el proceso AARL se hace un lavado al carbón cargado con una solución caliente de HCl al 3% durante 30 minutos previo al remojo del carbón en una solución al 5% NaOH y 1% NaCN a 110°C durante al menos 30 minutos. Después del periodo de remojo se hace recircular agua de baja fuerza iónica (ya sea agua desionizada o potable de alta calidad) a través de la columna para desorber el oro a altas presiones. El proceso en su totalidad toma entre 6 y 8 horas (Banini & Stange, 1994).

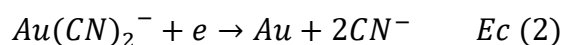
1.2.4 Elución electroquímica. En la regeneración electroquímica se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos mediante una fuente de corriente continua, lo que provoca una polarización del material poroso. Esta polarización afecta a las interacciones entre las especies retenidas y el material poroso, modificando el equilibrio de adsorción de estas especies. Según la naturaleza de las especies retenidas, el pH del medio y otros factores, se

puede favorecer la desorción de la sustancia adsorbida, con la posible regeneración del material poroso usado (Narbaitz & Cen, 1994).

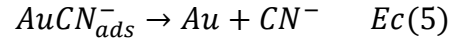
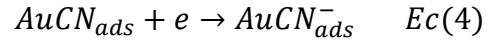
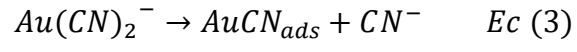
1.2.5 Electrodeposición de Au. La electrodeposición es una técnica de recubrimiento de metales, aleaciones y compuestos inorgánicos, con el fin de evitar la corrosión, endurecer las superficies, purificar metales o dar un acabado atractivo, este proceso se logra al pasar una corriente eléctrica a través de una solución que contiene los iones metálicos a depositar y el electrodo metálico a ser chapado, este último funciona como cátodo en una celda electroquímica el cual atrae los iones metálicos de la solución (Albella, 2003).

El cátodo (electrodo negativo) es la pieza de trabajo a enchapar y el ánodo (electrodo positivo) puede ser de dos tipos: ánodo de sacrificio (ánodo soluble) y ánodo permanente (ánodo inerte). El platino, el titanio y el acero son por lo general utilizados como ánodos inertes (Kohl, 2011).

La electrodeposición involucra la reducción de los iones metálicos presentes en el electrolito. Una reacción de reducción catódica se puede llevar a cabo mediante la aplicación de un voltaje a través de un par de electrodos sumergidos en la solución. El voltaje aplicado debe exceder el potencial reversible del electrodo para la reacción deseada a ocurrir. El oro es desplazado electrolíticamente de la solución de acuerdo a la siguiente reacción:



La deposición del metal ocurre en potenciales bajos, de aproximadamente -0.7 V. La deposición electrolítica de oro se produce por la adsorción del ion aurocianuro en el cátodo, seguida por la reducción de las especies adsorbidas, y posteriormente la disociación de las especies reducidas, de acuerdo a las reacciones mostradas en las ecuaciones 3, 4 y 5 (Marsden & House, 2006):



2. METODOLOGÍA

A continuación se exponen los reactivos, equipos, variables de respuesta y procedimientos que se utilizaron en el presente trabajo.

2.1 MATERIALES

Los reactivos utilizados en el desarrollo del trabajo son listados a continuación:

- **Carbón activado granular:** El CAG utilizado para la adsorción y desorción de los CAu fue el de referencia Calgon Filtrasorb® 400, con una humedad del 2%, porcentaje de cenizas en base seca de 9% y área superficial específica de 1075 m²/g.
- **Oro:** El Oro utilizado proviene de una mina ubicada en la vereda Quinamayó del municipio de Santander de Quilichao, norte del Cauca. Se realizó un tratamiento al metal para obtener un alto grado de pureza.
- **Electrodos:** ánodo dimensionalmente estable (DSA) de titanio recubierto con mezcla de óxidos de metales nobles suministrado por Magneto Special Anodes B.V. de 3.2 cm de ancho, 6 cm de alto, tipo malla (Figura 1A), y cátodo de acero inoxidable ANSI 314 de 3.2 cm de ancho y 5.5 cm de alto (Figura 1B). Para la prueba de desorción con recirculación en el ciclo ADA se utilizó como cátodo una malla de acero inoxidable ANSI 314 de 3.2 cm de ancho y 5.5 cm de alto.
- **Solución aurocianurada:** la solución patrón tenía una concentración de Au de 626.87 ppm, utilizada como adsorbato para cargar el CAG con los CAu.
- **Solución electrolítica:** se utilizaron dos soluciones electrolíticas: una de NaOH, y otra de Na₂SO₄+ NaOH con concentraciones de 2% y 5% p/v.

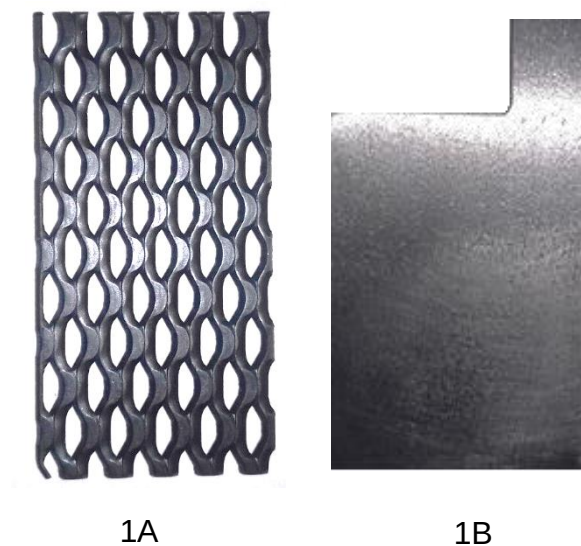


Figura 1. Electrodos utilizados para las pruebas experimentales. 1A. Ánodo de Titanio. 1B. Cátodo de Acero inoxidable

2.2 EQUIPOS

- **Celda electrolítica:** Se construyó en acrílico transparente con dimensiones: largo 9.6 cm, alto 4.6 cm y ancho 3.6 cm (Figura 2). La celda tenía de un solo compartimiento, una primera región con pestañas para sostener el cátodo, el ánodo y el separador acrílico, y una segunda región donde se ubicó un magneto para agitación. El volumen total de la celda fue de 160 cm³.
- **Fuente de energía:** se utilizó una fuente de poder BK Precisión 1786B y un potenciostato Gamry G750
- **Plancha de agitación:** marca Corning PC-420D
- **Espectrofotómetro de Absorción atómica:** Thermo Scientific ICE 3000 Series

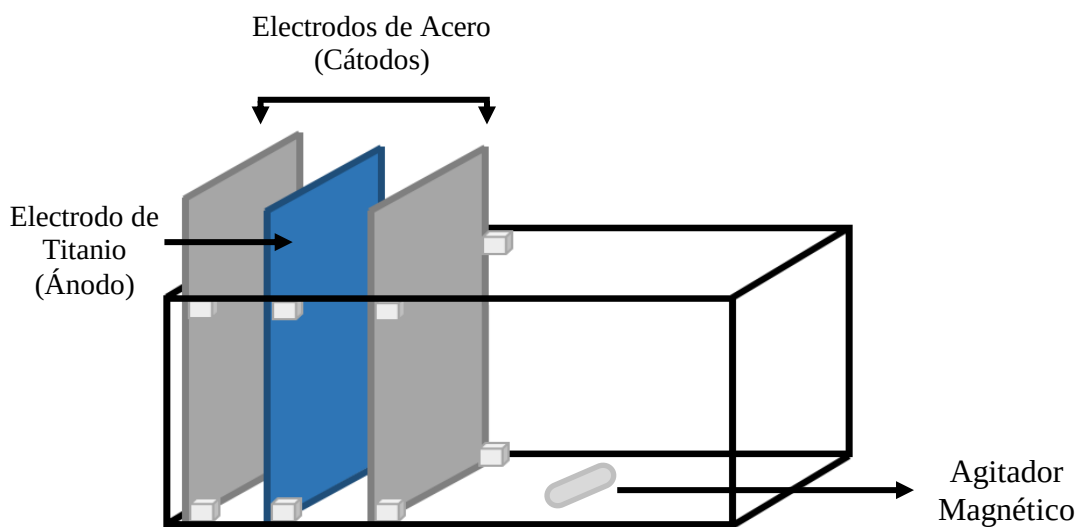


Figura 2. Celda Electrolítica con configuración inicial de electrodos.

- **Medidor de pH:** pH metro Fisher Scientific AB15
- **Mufla:** Marca terrígeno modelo D8. Temperatura máxima 1200°C
- **Balanza analítica:** balanza Radwag AS/220/C/2 con precisión de 0.0001 g.
- **Agitador orbital:** Gemmy Orbit Shaker VRN 480

2.3 VARIABLES DE RESPUESTA

2.3.1 Desorción. La desorción se definió como la tasa porcentual de la cantidad de oro recuperado con respecto al que adsorbió inicialmente en el CAG, y se calcula con la Ec. (6).

$$\% \text{ de desorción} = \frac{Au_{CAG_o} - Au_{CAG_{des}}}{Au_{CAG_o}} * 100 \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde,

Au_{CAG_o} : Cantidad de oro adsorbido inicialmente en el CAG (mg)

$Au_{CAG_{des}}$: Cantidad de oro remanente en el CAG después de la desorción (mg)

2.3.2 Porcentaje de regeneración. El porcentaje de regeneración (RE) del CAG se definió como la tasa porcentual de la capacidad de adsorción (mg Au/g CAG) del carbón regenerado con respecto al virgen, de acuerdo a la Ec. (7).

$$\% \text{ de RE} = \frac{\text{capacidad de adsorción de CAG regenerado}}{\text{capacidad de adsorción de CAG virgen}} * 100 \quad \text{Ec. (7)}$$

2.3.3 Consumo energético específico. El consumo energético específico se definió como la energía necesaria en kWh para desorber un (1) gramo de Au, y se calculó con la Ec (8).

$$Q = \frac{V * I * t}{w} \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde,

V, es el voltaje promedio

I, es la corriente

t, tiempo de elución

w, peso de oro recuperado en gramos

2.4 PROCEDIMIENTOS

2.4.1 Purificación del Oro. El proceso consistió en fundir 2.5 gramos de Au al 92% de pureza aproximadamente (22K) con Cu en exceso, laminarlo y cortarlo en láminas de 1 mm x 2 mm. Posteriormente se realizó un baño con ácido nítrico puro bajo calentamiento durante 3 horas, para consumir el Ag y el Cu. Finalmente se lavó con agua para eliminar los residuos de ácido. De este proceso se obtuvo aproximadamente 2.0 gramos de Au de alta pureza, en forma de escamas de alrededor de 0.1 mm.

2.4.2 Preparación de la solución aurocianurada. La solución se preparó en agua desionizada, añadiendo NaOH hasta regular el pH en 12 para evitar la formación de gas cianhídrico,

posteriormente se añadieron las cantidades estequiométricas de NaCN y Au en polvo manteniendo una relación 3.3:1 g NaCN/ g de Au, para obtener una concentración de 600 ppm de Au. La solución se sometió a agitación durante 39 horas.

Se usaron soluciones sintéticas de oro puro, por las siguientes razones:

- Las soluciones provenientes de minas contienen en su mayoría Oro y Plata, pero además pueden poseer cantidades significativas de hierro, cobre, zinc y otros metales que compiten durante la adsorción con el oro por los sitios activos del carbón.
- Para saturar el CAG usado en el ciclo ADA fue necesario usar soluciones con altas concentraciones (500 ppm) de Au de acuerdo al procedimiento (Breguncci et al., 2001). Las soluciones provenientes de minas tienen una concentración de oro de 10 ppm (Marsden & House, 2006), lo cual hubiera requerido grandes volúmenes de solución para adsorber la misma cantidad de Au.

2.4.3 Adsorción de los CAu en el CAG. Se añadió 112.9 g de CAG a 941 mL de solución aurocianurada y se agitó constantemente en un agitador de vaivén durante 6 horas. Se tomaron muestras de solución cada hora, a las cuales se les midió la concentración de Au mediante espectroscopia de Absorción Atómica, con el fin de determinar el tiempo en el cual todo el oro presente se adsorbía.

2.4.4 Ensayos Preliminares. Una vez cargado el CAG se procedió a realizar el proceso de elución electroquímica. El objetivo de los ensayos preliminares fue determinar el arreglo de los electrodos, la densidad de corriente, el electrolito y el tiempo de elución que arrojó mayor porcentaje de desorción

2.4.5 Arreglo inicial de los electrodos. Se realizaron 3 pruebas de desorción con el montaje que se muestra en la Figura 2, en el cual se usaban dos cátodos de acero inoxidable ANSI 314 y un ánodo de titanio ubicado entre ellos, el carbón (5 g) se repartió entre los dos

compartimientos formados por los electrodos. Se trabajó con 79 mL de una solución electrolítica de NaOH al 2% p/v, tiempos de elución de 1 y 4 horas, y densidad de corriente de 24 mA/cm².

2.4.6 Modificación del arreglo de los electrodos. A partir de los resultados de las 3 pruebas anteriores, se varió el arreglo de los electrodos en la celda electroquímica reemplazando un cátodo de acero inoxidable por un separador acrílico perforado (Figura 3A) y el tiempo se aumentó a 8 horas. Se realizaron 3 pruebas, una de regeneración catódica (Figura 3B), donde el carbón se ubicó entre el cátodo y el separador acrílico, otra para regeneración anódica (Figura 3C) donde el carbón se ubicó entre el ánodo y el separador, y la tercera sin usar separador acrílico.

2.4.7 Regeneración catódica. Se realizaron 8 pruebas preliminares utilizando la configuración mostrada en la Figura 3B. Se trabajó con 61 mL de solución de NaOH y de Na₂SO₄+NaOH como electrolito soporte al 2% p/v, tiempos de elución de 4 y 8 horas, y densidad de corriente de 12 y 24 mA/cm².

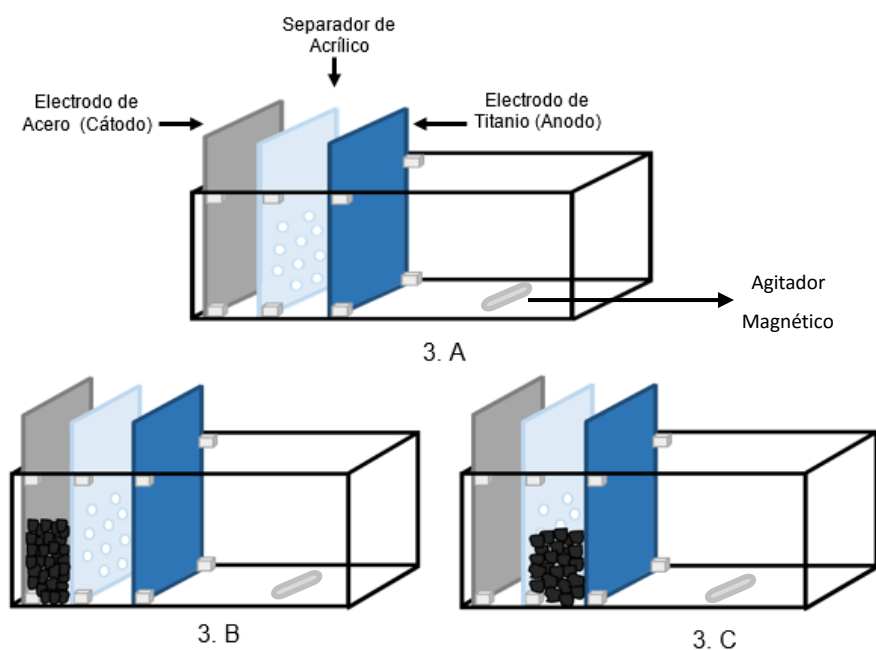


Figura 3. (A) Celda Electrolytica Modificada con separador de Acrílico perforado. (B) Celda Modificada para Regeneración Catódica. (C) Celda Modificada para Regeneración Anódica.

2.4.8 Ensayos Finales. A partir de los resultados obtenidos en las pruebas preliminares de regeneración catódica, se realizaron 2 pruebas finales a 24 mA/cm^2 de densidad de corriente y 4 horas de elución, con sus respectivas replicas. Se usó NaOH como electrolito soporte y se varió su concentración al 2% y al 5% p/v. Para todas las pruebas se trabajó con 61 ml de electrolito soporte.

El objetivo de los ensayos finales fue determinar la concentración del electrolito que genera el mayor porcentaje de desorción.

2.4.9 Ciclo adsorción – desorción – adsorción (ADA). Se preparó una segunda solución cianurada a 500 ppm de Au, siguiendo el procedimiento descrito en el numeral 2.4.2. La adsorción de oro en el CAG se realizó en dos etapas, con el fin de asegurar la saturación del mismo. En la primera etapa se puso en contacto 5.0 g de CAG con 250 mL de solución aurocianurada, tomando muestras de la solución cada hora para determinar la concentración de esta a medida que avanzaba el proceso. Cuando la disminución de la concentración de la solución fue menor al 25% (a las 7 horas), se filtró el carbón y la solución se reemplazó con 250 mL de solución madre, y se midió la concentración de oro en la solución durante las dos primeras y dos últimas horas. El CAG fue sometido a adsorción durante un tiempo total de 24 horas.

Con el carbón cargado se realizaron dos pruebas de desorción con las mismas condiciones usadas en las pruebas finales, y NaOH al 2% p/v como electrolito soporte. Se usaron dos configuraciones de celda: la primera fue la usada durante los ensayos preliminares y finales (Figura 3B), y la segunda tenía incorporada una bomba para recircular la solución con el fin de reducir las burbujas generadas en la configuración con agitación, y además, se utilizó una malla de acero reemplazando el electrodo convencional. (Figura 4).

En la configuración con agitación se utilizaron 61 mL de electrolito soporte, mientras que en la configuración con recirculación se usaron 250 mL. El carbón tratado se dejó secar

durante 24 horas, y se sometió de nuevo a saturación. A continuación se presenta la gráfica de la variación de concentración de Au en la solución respecto al tiempo de adsorción, antes y después del proceso de desorción.

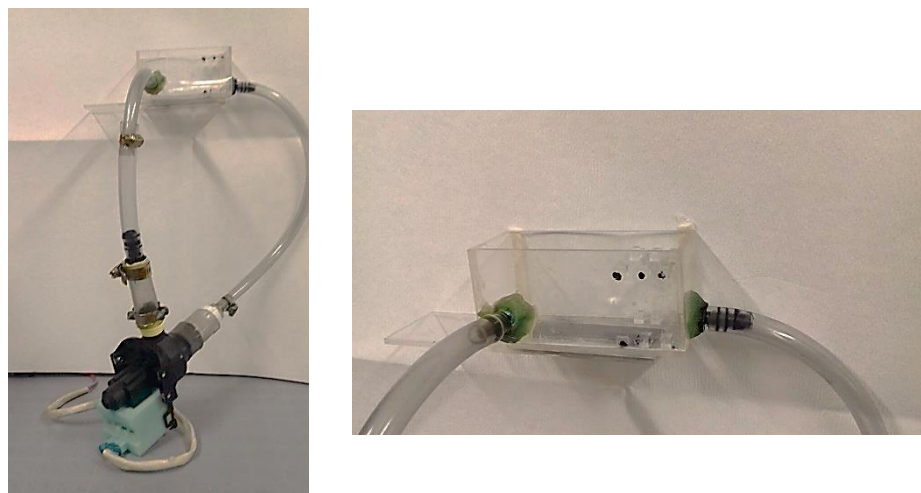


Figura 4. Desorción de CAu del ciclo ADA. Configuración de celda con recirculación de electrolito soporte

2.5 ANALISIS QUÍMICO

2.5.1 Ensayo al fuego. El procedimiento para llevar a cabo el ensayo al fuego para determinar la cantidad de Oro presente en el carbón es el siguiente: se marcan los crisoles de arcilla con Óxido de Hierro, se añaden los reactivos con las siguientes cantidades y en el siguiente orden: 2 g de Borato de Sodio (Bórax), 6 g de Carbonato de Sodio, 36 g de Oxido de Plomo (Litargirio) y 2 g de CAG, posteriormente se mezclan y se añade una capa delgada de NaCl, ya que este se funde primero y evita que se escapen partículas sólidas con los gases. Los crisoles se llevan a la mufla a 1000°C durante 2 horas. El carbón reduce una parte del Oxido de Plomo a Plomo metálico que colecta el oro y la plata presente en la muestra, y el resto del Oxido de Plomo reacciona con el Borato de Sodio y lleva los metales base a la escoria vítrea.

Pasadas las dos horas, se retiran los crisoles de la mufla y se vierten las muestras en una payonera, donde se dejan enfriar. Una vez frías las muestras, se separa el botón de plomo de la escoria vítrea, con la ayuda de un martillo, y se le da forma cúbica al botón. A continuación, el botón de plomo es sometido a copelación, proceso mediante el cual el plomo del botón se oxida y se absorbe en una copela de cemento o magnesita y deja un lecho de metal precioso conocido como gránulo. Para llevar a cabo la copelación se introducen las copelas a la mufla y se lleva la temperatura a 900°C, durante 40 minutos. El botón de plomo se deposita en la copela y se deja durante una hora en la mufla, a 900°C. Finalizado el proceso, se obtiene un granulo de oro y plata.

Cuando la cantidad de plata en el granulo es menor a la de oro, es posible que el oro recubra la plata, lo cual dificulta su consumo durante el proceso de purificación con ácido nítrico. Para evitar este fenómeno se realiza una encuartación, que consiste en añadir 3 veces de plata electrolítica lo que pesa el granulo, envolverlo en papel de plomo, y copelar nuevamente a 900°C y 40 minutos. El nuevo botón de oro y plata se lamina y se somete a un baño con ácido nítrico con calentamiento, inicialmente con un ácido al 10% p/v y posteriormente con ácido grado analítico.

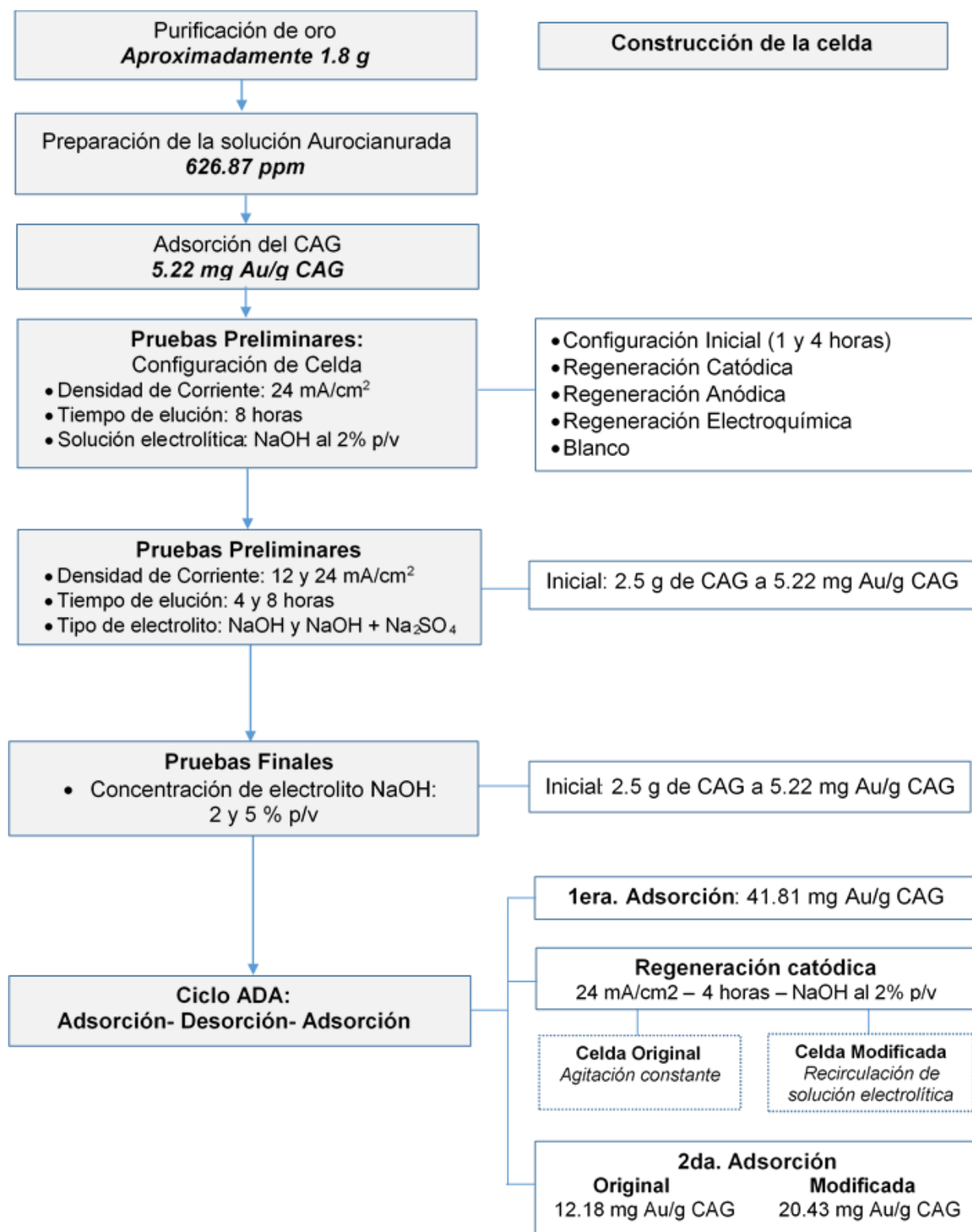
El contenido de oro del gránulo se determina mediante pesaje (gravimétrico) o disolviéndose en agua regia y leyendo mediante absorción atómica la concentración de oro en la solución ácida (ASTM International, 2013).

2.5.2 Espectroscopia de Absorción Atómica. La concentración de oro en la solución usada como electrolito soporte fue medida mediante absorción atómica.

La muestra de la solución se descompone en átomos mediante una llama u horno de grafito, ya que estos átomos absorben longitudes de onda características de la luz, se usó la longitud de onda del oro para determinar el contenido de este en la muestra. La muestra de solución se atomiza, y un haz de radiación electromagnética emitido desde átomos excitados pasa a través de la muestra vaporizada. Parte de la radiación se absorbe por los átomos en la

muestra. La cantidad de luz absorbida es proporcional al número de átomos de oro. Mediante la construcción de una curva de calibración, se calculó la concentración de oro (García & Báez, 2012).

2.6 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA METODOLOGIA EXPERIMENTAL



3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 ADSORCIÓN DE CAu EN CAG

El carbón utilizado en las pruebas preliminares y finales se cargó hasta 5.22 mg Au/g CAG. En la Figura 5 se presenta la curva de concentración de Au (mg Au/ g CAG) en el carbón activado respecto al tiempo.

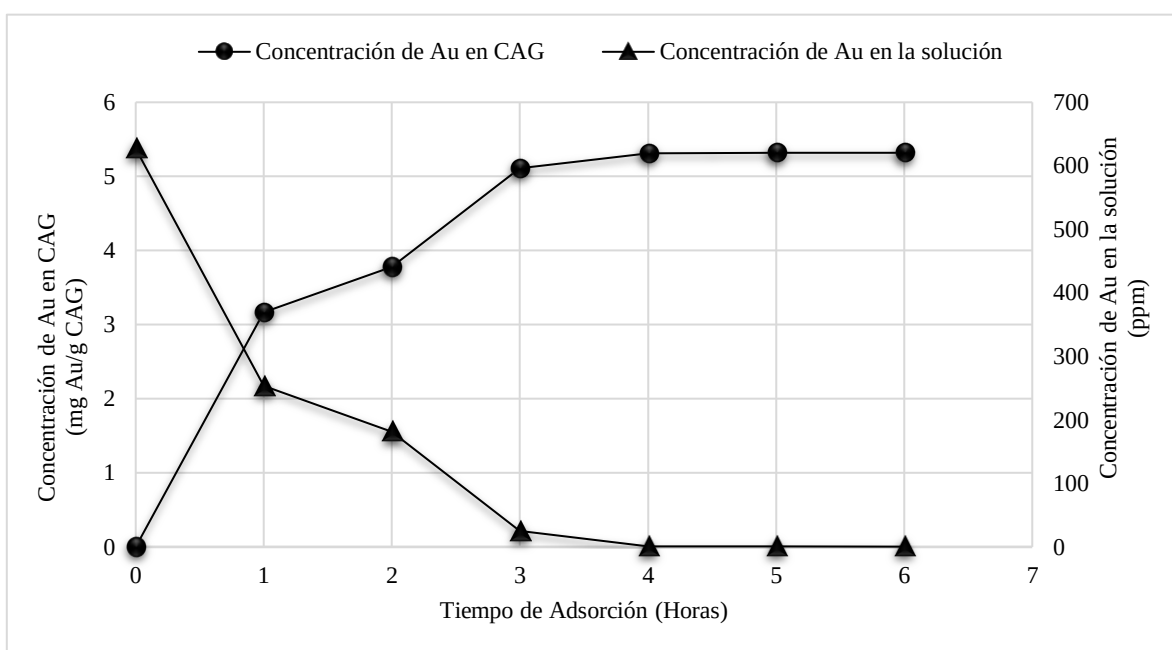


Figura 5. Curva de adsorción inicial de Au en CAG. Condiciones: T: 25°C

En la primera hora de la prueba, la velocidad de adsorción fue mayor, comparada con la de las dos horas siguientes, lo que corresponde con el hecho de que la tasa inicial de adsorción del ion aurocianuro es rápida, llevándose a cabo en los macroporos y posiblemente de los mesoporos, sin embargo la velocidad de adsorción decrece a medida que se acerca al equilibrio ya que se da en los microporos (Fleming & Nicol, 1984). Adicionalmente, la tasa de adsorción fue disminuyendo debido a que la concentración de Au en la solución disminuyó rápidamente y, al cabo de 4 horas tenía menos de 1 ppm, lo cual dificultaba aún más la adsorción, ya que esta es producida por la difusión del CAu hacia los sitios activos del CAG (Figura 5).

3.2 ELUCIÓN ELECTROQUÍMICA DE COMPLEJOS AUROCIANURADOS

3.2.1 Pruebas Preliminares

Efecto de la configuración de los electrodos en la celda electrolítica. Se realizaron 4 pruebas de desorción con tiempos de elución de 4 y 8 h, con densidad de corriente de 24 mA/cm² y NaOH al 2% p/v como electrolito soporte, cada una con diferente configuración de electrodos (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto del tipo de configuración de los electrodos sobre el porcentaje (%) de desorción de CAu.

Configuración	Tiempo (h)	Características	Desorción (%)
Inicial	4	2 cátodos y 1 ánodo. CAG en contacto con los dos electrodos	33
Catódica	8	1 cátodo, 1 ánodo, 1 separador. CAG en contacto con el cátodo	37
Anódica	8	1 cátodo, 1 ánodo, 1 separador. CAG en contacto con el ánodo	20
Sin separador	8	1 cátodo, 1 ánodo, 1 separador. CAG en contacto con los dos electrodos	23

Se utilizaron arreglos de electrodos diferentes a la configuración inicial para evaluar el efecto sobre la desorción de CAu. La regeneración catódica fue un 4% mayor que la configuración inicial, 17 y 14% respecto a las configuraciones anódica y sin separador, en relación a la desorción. Este hecho concuerda con el estudio realizado por Narbaitz y Cen (1994) donde la regeneración catódica es 5-10% más eficiente que la regeneración anódica debido a que en este mecanismo el cátodo es el electrodo de reducción y genera iones -OH que aumentan el pH local, evitando la readsorción de los CAu, ya que estos compiten con los iones hidroxilo por los sitios activos del carbón (Davidson, 1974).

Otro aspecto que posiblemente influyó para que la regeneración catódica arrojara porcentajes de desorción mayores, fue la distancia entre el cátodo y el CAG, ya que al estar más cerca de éste, el oro desorbido se electrodepositó más fácil y rápidamente en el cátodo, evitando así una posible re-adsorción o que los CAu quedaran en la solución.

Debido a que la configuración catódica arrojó el mejor resultado, se trabajó las pruebas posteriores con esta misma configuración.

Efecto del tiempo de elución sobre la desorción de CAu. Se llevaron a cabo pruebas a 1, 4 y 8 horas. En la Figura 6 se observa un efecto significativo en la desorción de CAu cuando se aumenta el tiempo de elución de 1 a 4 horas. Sin embargo, al incrementar el tiempo de elución de 4 a 8 horas, no se evidenció ninguna influencia, obteniéndose para estos dos tiempos un porcentaje de desorción promedio del 31%.

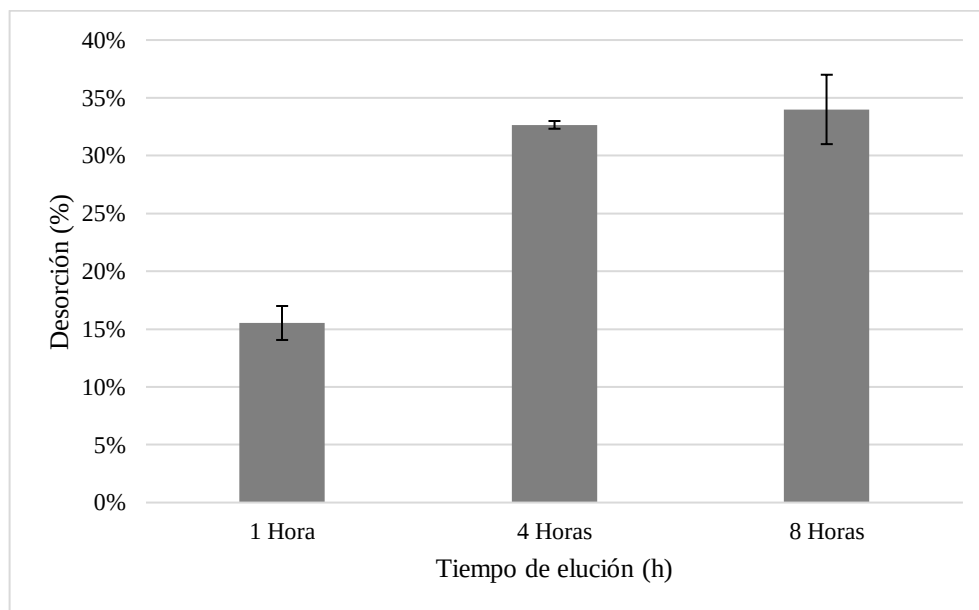


Figura 6. Efecto del tiempo de elución en la desorción (%) de CAu. Condiciones: Densidad de corriente 24 mA/cm², NaOH 2%p/v, 2.5 g CAG, T.25°C. (Barras de Error Estándar)

El hecho de que al aumentar de 4 a 8 horas el tiempo de elución no genere ninguna influencia sobre el porcentaje de desorción se atribuye a la posible re-adsorción de los CAu en el carbón activado durante el proceso de elución electroquímica, ya que a medida que se desorben los CAu, el CAG libera parte de sus sitios activos y permite que algunos de los complejos ya desorbidos y no electrodepositados en el cátodo vuelvan a adsorberse, y dado que el proceso de adsorción se rige por la difusión de los CAu en el CAG, este siempre tratará de llegar al equilibrio.

Efecto de la densidad de corriente sobre la desorción de CAu. Se encontró que se obtuvieron mayores porcentajes de desorción cuando se incrementó la densidad de corriente. La mayor desorción obtenida fue de 41%, para las condiciones de 4 horas, 24 mA/cm² y NaOH como electrolito soporte y modificador de pH al 2% p/v (Figura 7).

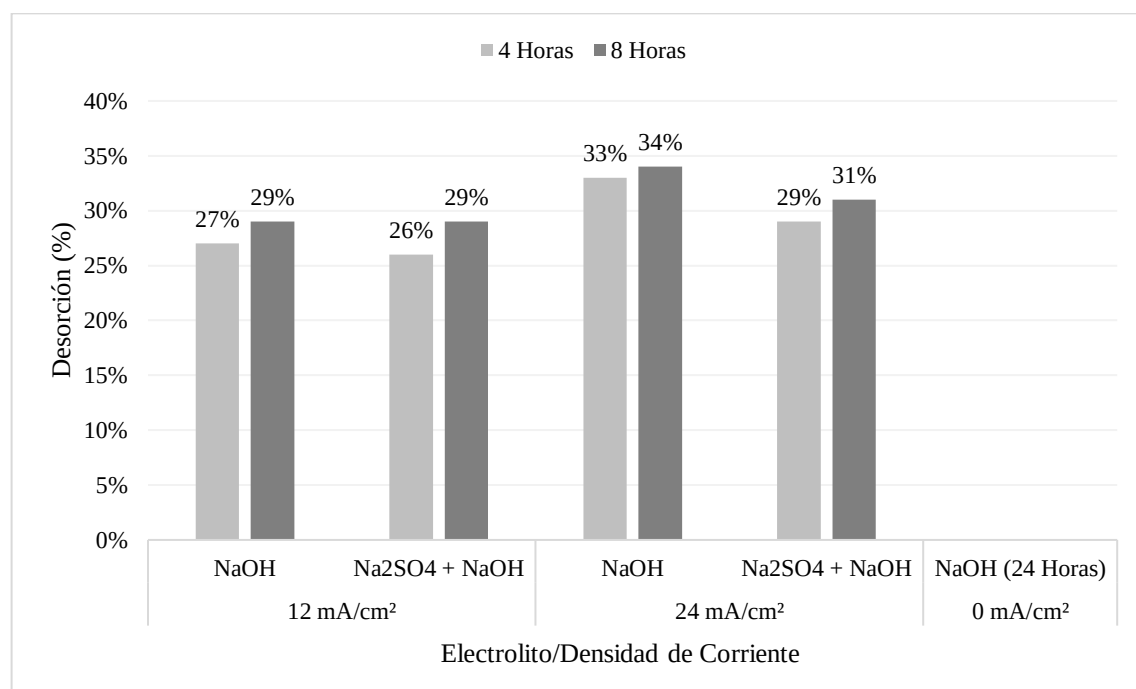


Figura 7. Efecto de la densidad de corriente (j) y del tipo de electrolito soporte sobre el porcentaje de desorción de CAu. Condiciones: concentración 2% p/v, T. 25°C, 2.5 g CAG

Se llevó a cabo una prueba sin la aplicación de corriente (0 mA/cm^2) durante 24 horas, y se obtuvo 0% de desorción, lo que corrobora el efecto del proceso electroquímico sobre la elución, y concuerda con los resultados obtenidos por Fleming (Fleming & Nicol, 1984), quien estudió la reversibilidad del proceso de adsorción de Au en CAG y concluyó que el proceso era extremadamente lento, evidenciándose una leve desorción después de 48 horas. Los niveles de densidad de corriente escogidos, fueron mayores a los reportados en la literatura, buscando obtener un mayor porcentaje de desorción en el menor tiempo posible de elución, según la primera ley de Faraday de la electrólisis, que indica que la masa depositada en un electrodo en un proceso de electrólisis es proporcional a la energía transferida.

Efecto del tipo de electrolito soporte sobre la desorción de CAu. Los porcentajes de desorción más altos se obtuvieron cuando se utilizó NaOH como electrolito soporte, siendo este resultado más evidente cuando se trabajó a mayor densidad (24 mA/cm^2), obteniéndose un incremento del 29% en el porcentaje de desorción con respecto a la solución de NaOH+Na₂SO₄. El pH se mantuvo por encima de 10 para los dos tipos de solución (Figura 7).

3.2.2 Pruebas finales

Efecto de la concentración del electrolito soporte sobre el porcentaje de desorción de CAu. Se realizaron pruebas de desorción electroquímica a 24 mA/cm^2 , tiempo de elución de 4 horas y NaOH al 2% y 5% p/v como electrolito soporte.

Se observa que al trabajar con solución al 2% p/v se obtiene un incremento del 3% en el porcentaje de desorción respecto al obtenido con la solución al 5%p/v (Figura 8).

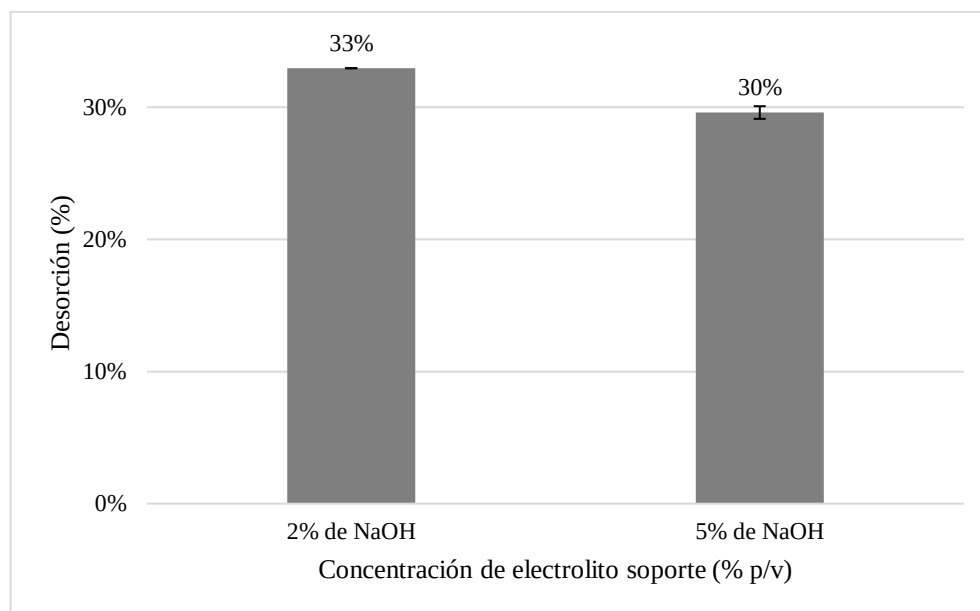


Figura 8. Efecto de la concentración del electrolito soporte sobre la desorción de CAu. Condiciones: densidad de corriente 24 mA/cm², NaOH, 4 horas de elución, 2.5 g CAG, T.25°C. (Barras de error estándar)

3.2.3 Adsorción inicial en el Ciclo Adsorción – Desorción – Adsorción (ADA). Para el ciclo ADA el proceso de adsorción inicial se realizó en dos etapas, en la primera se cargó el carbón a 22.42 mg Au/g CAG, y para asegurar una carga máxima en 24 horas se puso en contacto el CAG con una nueva solución cianurada a la misma concentración de la anterior, alcanzando una carga de 41.81 mg Au/g CAG. (Tabla 2)

Tabla 2. Adsorción de Au en CAG ciclo ADA. 1era. Etapa.

Tiempo (h)	Carga de Carbón (mg de Au/CAG)
0	0.00
1	21.25
2	22.40
3	22.55
5	22.69
6	22.71
7	22.42
8	40.64
24	41.76
26	41.81

La adsorción se realizó de este modo debido a que la tasa inicial de adsorción del ion aurocianuro es rápida, llevándose a cabo en los sitios más activos de los macroporos y posiblemente de los mesoporos, sin embargo la velocidad de adsorción decrece a medida que se acerca al equilibrio ya que se da en los microporos (Fleming & Nicol, 1984). Por lo tanto cuando la concentración de la solución cianurada mostró un cambio menor al 2%, se renovó la solución, y se pudo corroborar que la tasa de adsorción volvió a aumentar.

3.2.4 Desorción en el Ciclo Adsorción – Desorción – Adsorción (ADA). La desorción en el ciclo ADA se realizó a 24 mA/cm², tiempo de elución de 4 horas, NaOH como electrolito soporte al 2% p/v y configuración catódica. Se realizaron dos tipos de desorción: una con agitación constante por medio de una plancha de agitación, y otra con recirculación constante de solución electrolítica.

En la Figura 9 se muestra el efecto de la inclusión del mecanismo de recirculación sobre el porcentaje de desorción, así como de la desorción con agitación constante. También se observa su influencia en el porcentaje de regeneración del CAG.

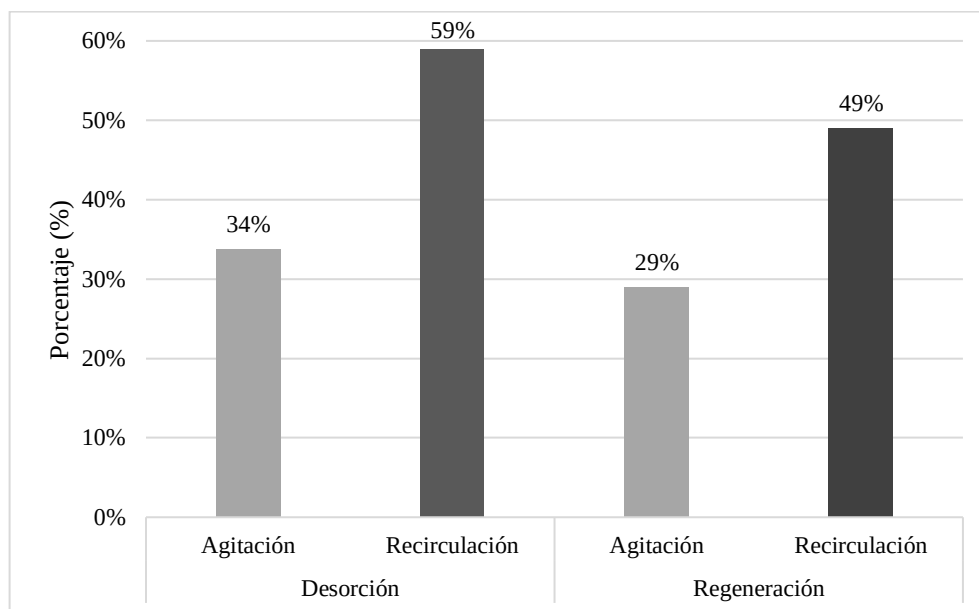


Figura 9. Porcentajes de desorción y regeneración en ciclo ADA. Densidad de corriente $24\text{mA}/\text{cm}^2$, 4 horas de elución, NaOH 2% p/v, 2.5 g CAG, T.25°C.

La desorción realizada con el mecanismo de recirculación de solución electrolítica fue un 69% más eficiente que la configuración con agitación normal, ya que con este montaje disminuyó la aglomeración de burbujas en el lecho de CAG como en la superficie del cátodo, las cuales disminuyen el área superficial efectiva del electrodo, causando fluctuaciones en la densidad de corriente y la tasa de desorción.

El hecho de que el electrolito soporte estuviera recirculándose a través de la celda, mejoró los fenómenos de transferencia de masa, aumentando la posibilidad de que los CAu que se encontraban en la solución pudieran llegar a depositarse en el cátodo, y así evitar una posible readsorción.

Se obtuvo una regeneración máxima del CAG de 49% cuando se trabajó con el mecanismo de recirculación, ya que este está relacionado directamente con el porcentaje de desorción.

3.2.5 Adsorción posterior a la desorción en el Ciclo Adsorción – Desorción – Adsorción (ADA). La adsorción realizada después de la desorción en el ciclo ADA se llevó a cabo bajo las mismas condiciones que la adsorción inicial, con el fin de poder calcular el porcentaje de regeneración del CAG.

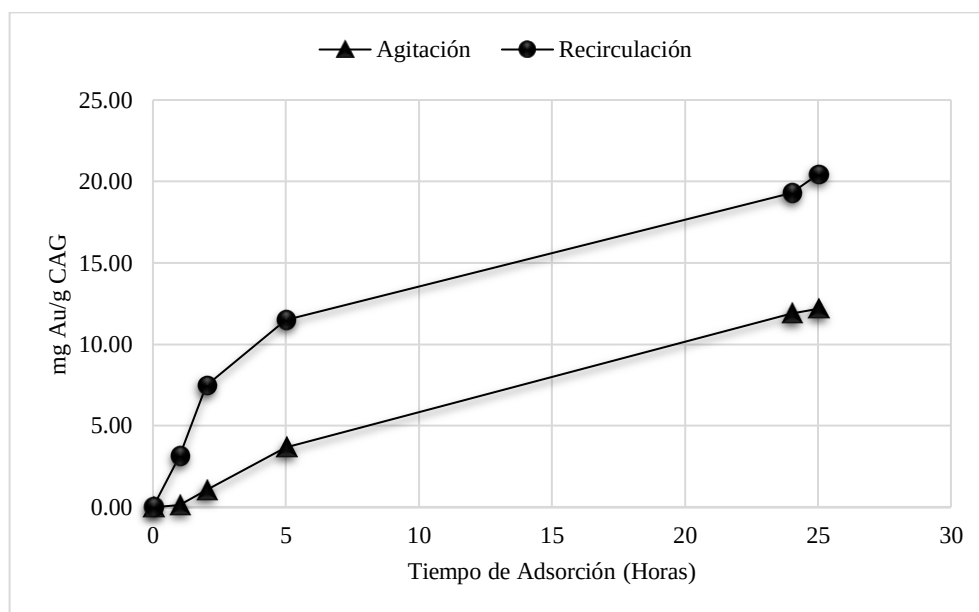


Figura 10. Curva de adsorción del Au en CAG para el ciclo ADA, posterior a la desorción. Condiciones: T.25°C

Para el carbón desorbido con el montaje con recirculación, la velocidad de adsorción fue mayor en las primeras 3 horas, comparada con la de las horas posteriores (Figura 10), siguiendo el mismo comportamiento de las adsorciones realizadas previamente (Figura 5 y Tabla 2). La velocidad de adsorción para el carbón desorbido con el montaje con agitación fue más estable, y se atribuye posiblemente a la desorción que se obtuvo para cada muestra de carbón, por ende se presume que a mayor desorción, mayor regeneración del CAG.

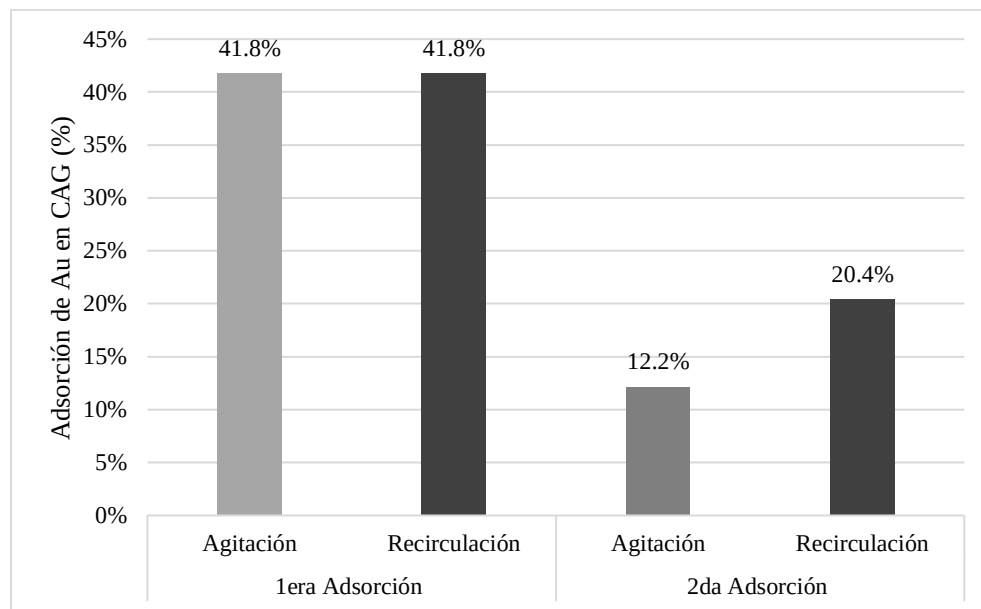
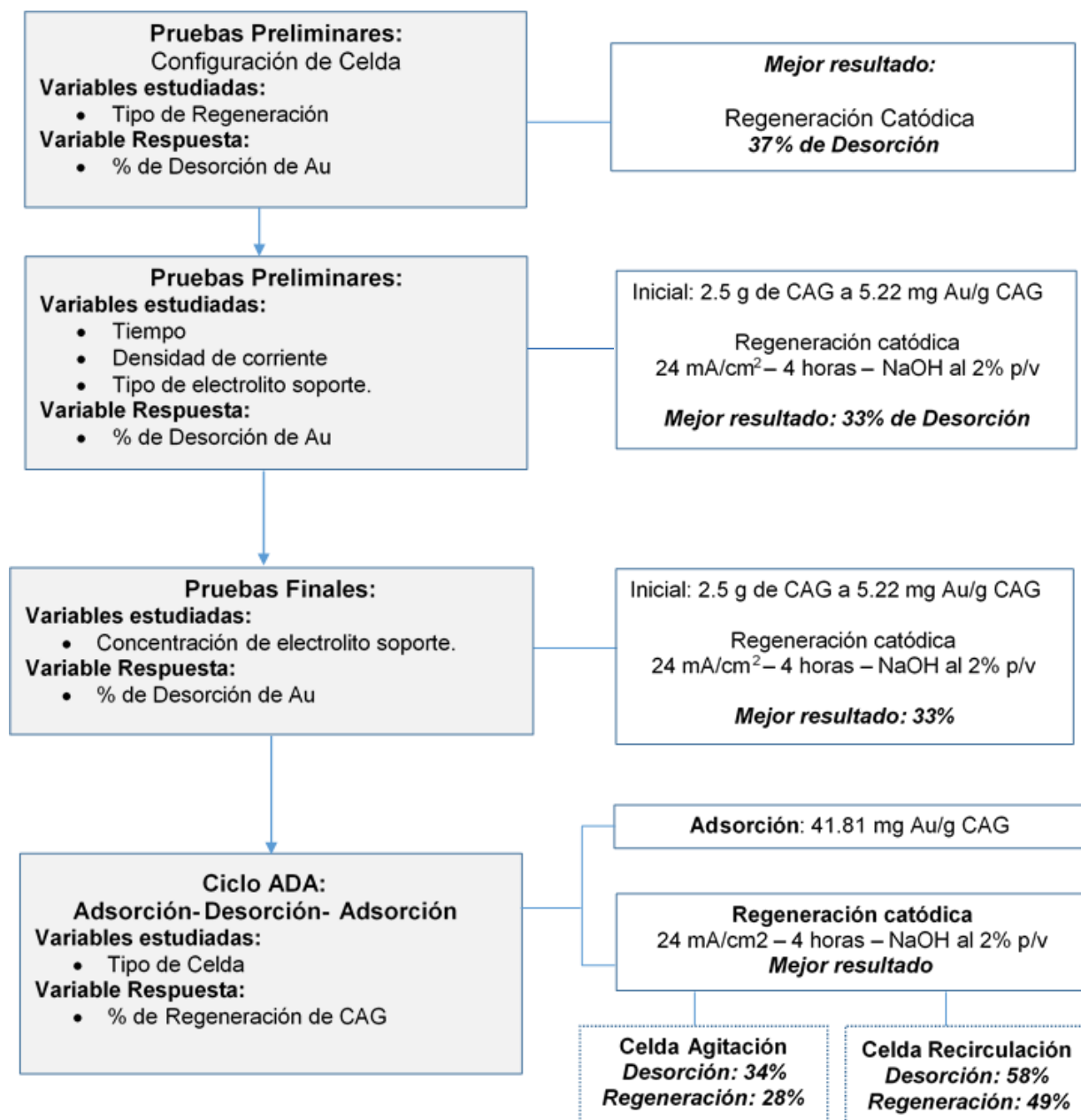


Figura 11. Porcentajes de adsorción de Au en CAG para la Adsorción Inicial y posterior a la desorción en el ciclo ADA.

El CAG sometido a la desorción en la celda con agitación constante alcanzó un 30% de la capacidad de carga que tuvo inicialmente, mientras que el CAG que se sometió a desorción en la celda con recirculación alcanzó el 49% de capacidad de carga inicial, resultados que corroboran que a mayor desorción, mayor regeneración, la cual depende directamente de la capacidad de carga del CAG.

3.2.6 Diagrama de bloques de resultados



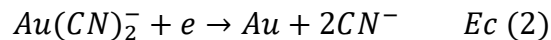
3.2.7 Consumo energético específico. Se calculó el consumo específico de energía por g de oro recuperado, con las condiciones que arrojaron el mayor porcentaje de desorción (59%). Para realizar el cálculo se utilizó la Ec. (8) y se tuvo en cuenta el voltaje promedio de las pruebas que fue de 5 voltios.

$$C = \frac{V * I * t}{w} \quad Ec. (8)$$

Se obtuvo un consumo de $61.63 \frac{\text{kWh}}{\text{g Au recuperado}}$.

A partir de lo anterior, se calculó cuánto cuesta recuperar un gramo de oro utilizando la técnica de elución electroquímica, y se obtuvo un valor de COP \$11,094. Este valor equivale al 9% del costo de un gramo de oro (Al 27/04/2016 es de COP \$117,892).

3.2.8 Eficiencia de corriente. Por medio de las leyes de Faraday de la electrólisis (Bhattacharyya, 2015) se calculó la masa teórica de Au depositada en el cátodo basándose en la reacción de reducción (Ec.2) ocurrida en este electrodo, para un tiempo de 4 horas y una corriente de 0.19 A, y se obtuvo un valor de 1.40 g de Au, utilizando la Ec. (9).



$$m_T = \frac{E * I * t}{F} \quad Ec (9)$$

$$E = \frac{\text{Peso atómico } (\frac{g}{mol})}{\text{Número de valencia}} \quad Ec (10)$$

Donde,

m_T : masa teórica de la sustancia depositada en el electrodo (g)

E: peso equivalente (g/mol)

I: corriente (A)

t: tiempo de tratamiento (s)

F: Faradio, que equivale a 96500 Coulomb/mol (C/mol)

La eficiencia de corriente se calculó mediante la Ec. (11), y se obtuvo un valor del 5.6 %.

$$\text{Eficiencia de corriente (\%)} = \frac{m_{Au \text{ real}}}{m_{T \text{ Au teórica}}} * 100 \quad \text{Ec (11)}$$

Donde,

$m_{Au \text{ real}}$: Masa real de Au depositada en el cátodo

$m_{T \text{ Au teórica}}$: Masa teórica de Au depositada en el cátodo

Al aplicar la ley de Faraday se asume que toda la carga eléctrica transferida a la celda electrolítica se usa para electrodepositar el Au en el cátodo, sin tener en cuenta otros posibles fenómenos que se presenten en el sistema, como la evolución de hidrogeno y la generación de iones hidroxilo, que demandan gran parte de la corriente aplicada. En la elución electroquímica de CAG cargado con Au, se presentan dos fenómenos que requieren de energía para desarrollarse, la desorción de los CAu, y su posterior electrodeposición en el cátodo en forma de Au (Figura 10), motivo por el cual existe una marcada diferencia entre la masa de Au real depositada y la masa de Au teórica depositada, además que parte del Au desorbido queda en la solución electrolítica, y esto se refleja en una eficiencia menor a la que se obtiene generalmente en los procesos de electrodeposición que está entre 8 y 12.5% (Renovare International, 2011).

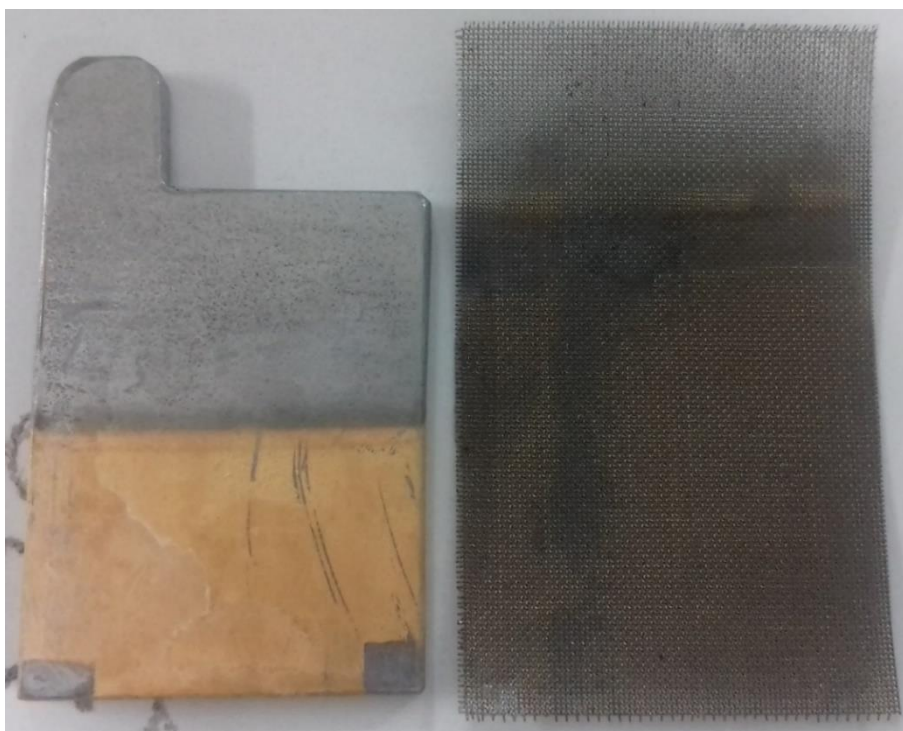


Figura 12. Au electrodepositado en el cátodo después del ciclo ADA.

3.2.9 Eficiencia de electrodeposición. Esta eficiencia se calculó por medio de la Ec. (12), y se obtuvo un valor del 98%.

$$\text{Eficiencia de electrodeposición (\%)} = \frac{m_{Au\ elec}}{m_{Au\ des}} * 100 \quad Ec(12)$$

Donde,

$m_{Au\ elec}$: masa de Au electrodepositada en el cátodo (mg)

$m_{Au\ des}$: masa total de Au desorbida del CAG (mg)

La eficiencia se calculó utilizando el mejor resultado de desorción que fue del 59%.

La eficiencia de electrodeposición alcanzada se encuentra dentro del rango de eficiencias obtenido en estudios de electrodeposición de Au disuelto en soluciones acidas y básicas de cianuro, así como en soluciones libres de este, que está entre el 80% y el 99% (Kohl, 2011).

3.2.10 Comparación de porcentajes de desorción por carga específica. Los porcentajes de desorción obtenidos se compararon con los publicados en la literatura (Martins, 1993) , quien trabajó con resinas poliméricas como adsorbente, bajo una misma carga específica $\dot{Q}$ (C/g) con un valor de 1094.4 C/g, carga calculada para 4 horas de elución. Según los datos reportados por Martins, para alcanzar este mismo valor de $\dot{Q}$ era necesario un tiempo de elución de 24 horas, para el cual obtuvo un porcentaje de desorción de aproximadamente 18%, mientras que en el presente estudio se obtuvo un porcentaje máximo de desorción del 59%.

Esta comparación fue realizada teniendo en cuenta que la concentración de Au en el CAG (mg Au/g CAG) y la concentración de Au en las resinas (mg Au/g resinas) fueran similares, para lo cual se tomó la máxima concentración obtenida durante el estudio que fue de 41.81 mg Au/g CAG (Ver Sección 3.2.3).

4. CONCLUSIONES

- Los resultados del proceso de elución electroquímica de CAG cargado con Au arrojaron una desorción del 59%, a las mejores condiciones experimentales usadas en esta investigación, que fueron, regeneración catódica, densidad de corriente de 24 mA/cm^2 , tiempo de elución de 4 horas y celda con recirculación de solución electrolítica.
- La desorción con un montaje de celda con recirculación de solución electrolítica influyó positivamente ya que arrojó un porcentaje de desorción del 59% en comparación con el 33% obtenido para la elución a las mismas condiciones pero con agitación constante.
- Con la solución electrolítica de NaOH se obtuvieron porcentajes de desorción mayores comparados con los obtenidos usando la solución de NaOH + Na₂SO₄. Igualmente, al usar NaOH se controla el pH de la solución, aspecto fundamental para garantizar la seguridad del proceso, sin costos adicionales.
- Se obtuvo una regeneración del CAG del 29% y 49%, para el tratamiento con agitación constante y con recirculación, respectivamente.
- Basándose en los resultados obtenidos, se concluye que la elución electroquímica de CAG cargado con complejos aurocianurados, es una alternativa promisorio para la recuperación de Au, con respecto a los métodos actuales, por la ausencia de cianuro en el proceso de elución, tiempos menores de operación, y porque la electrodeposición del Au y la regeneración del CAG se realizan de manera simultánea a la desorción.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Albella, M. (2003). *Láminas delgadas y recubrimientos. Preparación, propiedades y aplicaciones*. Madrid: Solana e hijos A.G., S.A.
- ASTM International. (2013). ASTM E1568 – 13. Standard Test Method for Determination of Gold in Activated Carbon by Fire Assay, *i*, 13–16. doi:10.1520/E1568-13.2
- Banini, G., & Stange, W. (1994). Modelling of the AARL elution process. *Minerals Engineering*, 7(94), 591–604.
- Bhattacharyya, B. (2015). *Electrochemical Micromachining for Nanofabrication, MEMS and Nanotechnology*. Waltham: Elsevier Inc.
- Breguncci, V. a L., Ribeiro, C. P., & Martins, a H. (2001). Gold recovery from alkaline cyanide solutions by electrochemical elution of strong-base anionic polymeric resins. *Minerals and Metallurgical Processing*, 18, 49–53.
- Davidson, R. J. (1974). The mechanism of gold adsorption on activated charcoal, (November), 67–76.
- Davidson, R. J., & Duncanson, D. (1977). The elution of gold from activated carbon using deionized water. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. Retrieved from <http://www.saimm.co.za/Journal/v077n12p254.pdf>
- Feng, D., Tan, H., & van Deventer, J. S. . (2003). Ultrasonic elution of gold from activated carbon. *Minerals Engineering*, 16(3), 257–264. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0892687502003151>
- Fleming, C. a, & Nicol, M. J. (1984). The absorption of gold cyanide onto activated carbon. III.-

- Factors influencing the rate of loading and the equilibrium capacity. *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 84(4), 85–93.
- García, R., & Báez, A. (2012). Atomic Absorption Spectrometry (AAS). *Atomic Absorption Spectroscopy*, 1–12. doi:10.5772/1090
- Kohl, P. A. (2011). Electrodeposition of Gold. *Modern Electroplating: Fifth Edition*, 115–130. doi:10.1002/9780470602638.ch4
- Marsden, J., & House, I. (2006). *The chemistry of gold extraction, Second Edition*. Englewood: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Martins, A. H. (1993). The extraction of gold and silver by electroelution of strong-base polymeric resins. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 32(1), 85–87.
- Morelli, S., & Garay, L. (2013). *Minería en Colombia: Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos*. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Narbaitz, R. M., & Cen, J. (1994). Electrochemical regeneration of granular activated carbon. *Water Research*, 28(8), 1771–1778. doi:10.1016/0043-1354(94)90250-X
- Rees, K. L. (2000). *The leaching and adsorption behaviour of gold ores*. The University of Melbourne.
- Renovare International. (2011). Reviewing the operation of gold electrowinning. Retrieved July 30, 2016, from <http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/926595/15075987/1320999412370/RRII-+110010-0-AuRENOCELL.pdf>
- Soleimani, M., & Kaghazchi, T. (2008). Gold recovery from loaded activated carbon using different solvents. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers*, 39(1), 9–11. doi:10.1016/j.jcice.2007.11.004

- Sun, H., Liu, Z., Wang, Y., & Li, Y. (2013). Electrochemical in situ regeneration of granular activated carbon using a three-dimensional reactor. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 25 Suppl 1, S77–9. doi:10.1016/S1001-0742(14)60630-6
- Wang, L., & Balasubramanian, N. (2009). Electrochemical regeneration of granular activated carbon saturated with organic compounds. *Chemical Engineering Journal*, 155(3), 763–768. doi:10.1016/j.cej.2009.09.020
- Weng, C.-H., & Hsu, M.-C. (2008). Regeneration of granular activated carbon by an electrochemical process. *Separation and Purification Technology*, 64(2), 227–236. doi:10.1016/j.seppur.2008.10.006