

ELECTROQUÍMICA DE ORO EN ÁCIDO CLORHÍDRICO

Julieth Abadía López
Universidad del Valle

Claudia L. Pérez Valdés
Universidad del Valle

Mario Grajales Tamayo
Universidad del Valle

Recibido: noviembre 19, 2009 Aceptado: diciembre 9, 2009

Resumen

Se investigó la electroquímica del oro en soluciones clorhídricas ácidas usando voltamperometría cíclica y voltamperometría de redisolución anódica. Los resultados demostraron que la disolución del oro y la formación de óxidos de oro ocurren a potenciales por encima de +0.9 V (vs. Ag / AgCl). La reducción de AuCl_4^- sobre electrodo de grafito pirolítico rugoso (RPG) procede con adsorción lenta y mostró un pico bien definido a +0.55 V; este pico presentó una pobre resolución con electrodos de platino y carbono vítreo. La voltamperometría de redisolución anódica se efectuó con electrodo RPG sobre soluciones puras de HAuCl_4 y sobre mezclas de H_2PdCl_4 y HAuCl_4 (entre 20 y 70 ppm, en HCl 1.0 M), electrodepositando a -0.28 V o a 0.45 V durante cuatro minutos (tres de agitación más uno de reposo) y redisolviendo con un barrido lineal desde +0.0 hasta +1.15 V a 100 mV/s. Con mezclas de H_2PdCl_4 + HAuCl_4 a -0.28 V, se depositan simultáneamente Au, Pd y una aleación Au-Pd. A 0.45 V únicamente se deposita Au. La voltamperometría de redisolución anódica fue aplicada con buenos resultados a la determinación de oro en lixiviados clorhídricos provenientes de la precipitación de platino como $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_6$.

Palabras claves: oro; electroquímica; redisolución anódica.

Abstract

The electrochemistry of gold in chloride solutions was investigated using cyclic voltammetry and anodic stripping voltammetry. The results demonstrated that dissolution of gold and formation of oxides occurs at more positive potentials than +0.9 V (vs. Ag/AgCl). Reduction of AuCl_4^- on rugged pyrolytic graphite electrode (RPG) occurs with slow adsorption and showed a very well defined peak at +0.55 V; this peak presented a poor resolution with platinum and glassy carbon electrodes. Anodic stripping voltammetry was carried out on RPG electrode in mixed and pure solutions of H_2PdCl_4 and HAuCl_4 (between 20 and 70 ppm in HCl 1.0 M), depositing at -0.28 V or at +0.45 V during four minutes (three of agitation, one left standing) followed by stripping with linear sweep voltammetry from +0.0 to +1.15 V at 100 mV/s. With mixtures of H_2PdCl_4 + HAuCl_4 at -0.28 V, Au, Pd and Au-Pd alloy are deposited. At 0.45 V only Au is deposited. Anodic stripping voltammetry was applied with good results to determine gold in solutions used to extract platinum as $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_6$.

Keywords: gold; electrochemistry, anodic stripping voltammetry.

1 Introducción

El platino en la naturaleza usualmente se encuentra asociado con oro, rutenio, osmio, rodio, iridio y paladio. En el proceso de extracción del platino, el platino y los minerales asociados se disuelven con agua regia. Debido a la baja solubilidad del hexacloroplatinato amónico en NH_4Cl (0.0028 g/100 mL en NH_4Cl 1M [1]) el platino se precipita como $(\text{NH}_4)_2\text{PtCl}_6$ con NH_4Cl . Posteriormente el hexacloroplatinato amónico se calcina para formar esponja de platino [2, 3]. En el lixiviado resultante del proceso de extracción de platino generalmente quedan oro y paladio en concentraciones que podrían justificar su extracción. La electroquímica, como técnica analítica y extractiva, puede ser una herramienta valiosa y competitiva en precio y calidad con otras técnicas convencionales como la gravimetría y la espectrofotometría de absorción atómica. La aplicación de la electroquímica a la determinación y cuantificación de oro en un lixiviado clorhídrico exige el conocimiento del comportamiento del oro en presencia de iones cloruros. El objetivo del presente trabajo es estudiar el comportamiento voltamperométrico de oro en presencia del ion cloruro y explorar la potencialidad de la técnica de redisolución anódica en la cuantificación de oro en lixiviados clorhídricos comerciales.

2 Parte experimental

Se realizó voltamperometría cíclica y voltamperometría de redisolución anódica de oro sobre soluciones acuosas clorhídricas usando tres electrodos (trabajo, referencia y auxiliar). El electrodo auxiliar fue platino y el de referencia Ag/AgCl en solución acuosa saturada de KCl (0.197 V vs. ENH). Como electrodos de trabajos se usaron oro, platino, carbono vítreo (GC) y grafito pirolítico rugoso (RPG). El electrodo de oro se construyó a partir de una lámina de oro (ALFA) de 0.025 mm de grosor y 99.95 % de pureza (área geométrica 0.04 cm^2). La superficie del electrodo de oro se limpió con una lija metalográfica fischer N° 2/0 serial 471, se enjuagó con agua destilada y se pretrató, antes del registro de cada voltamperograma, mediante varios barridos sucesivos en la solución de trabajo por un tiempo de 10 minutos a 100 mV/s en una ventana de potencial entre 0.0 y 1.6 V (vs. Ag/AgCl). Las soluciones de H_2SO_4 fueron preparadas en agua bidestilada empleando H_2SO_4 al 95 % (EM SCIENCE). El HCl empleado fue HCl al 37 % (EM SCIENCE). El pretratamiento del RPG consistió en lijar su superficie con una lija de agua número 400 acoplada a una rueda para pulir. Este procedimiento se realizó cada vez que se tomó un voltamperograma. Para todo el estudio se empleó un sistema electroquímico bipotenciostado [4] construido en el laboratorio de Procesos Electrónicos de la Universidad del Valle, provisto de un bipotenciostato, un generador de funciones y dos celdas de vidrio unidas mediante un puente salino empaquetado con agar y Na_2SO_4 . En una de las celdas se colocó el electrodo de trabajo, el auxiliar y un extremo del puente salino, en la otra el

electrodo de referencia y el otro extremo del puente salino. Para el registro de los datos se empleó un registrador X-Y Bauch & Lomb modelo 2000 fabricado por la Houston Instrument Division. Todos los potenciales en este trabajo son reportados con respecto al electrodo saturado de Ag/AgCl, KCl (0.197 V vs. ENH)

3 Resultados y discusión

3.1 Voltamperometría cíclica sobre un electrodo de oro en H_2SO_4 1.0 M

El voltamperograma de la Figura 1 muestra el comportamiento del electrodo de oro en H_2SO_4 1.0 M en una ventana de potencial entre 0.0 y 1.6 V a 100 mV/s en solución desaireada. En la Figura 1 se puede ver un amplio pico de oxidación entre 1.10 y 1.40 V respectivamente y un agudo pico de reducción a 0.91 V.

Según Pourbaix [5] cuando el barrido se lleva hasta potenciales tan altos como 1.6 V y pH 0 se forma el óxido áurico hidratado ($Au_2O_3 \cdot 3H_2O$) o hidróxido áurico ($Au(OH)_3$). Algunos investigadores [6,7] han postulado que la formación del $Au(OH)_3$ comienza a 1.0 V con la descarga del agua, la cual forma sobre la superficie de oro una capa de OH adsorbido (Au/OH_{ads}). El amplio pico de oxidación entre 1.0 y 1.4 V está constituido por varios picos sucesivos atribuidos por Hoar [8] a la formación de Au_2O_3 con diferentes grados de hidratación. El pico de reducción que sale a 0.91 V en la Figura 1 se debe a la reducción de los óxidos áuricos hidratados. Estudios realizados con microbalanza de cristal de cuarzo [9,6] muestran que hasta potenciales de 1.5 V en soluciones acuosas de $HClO_4$ y H_2SO_4 no se disuelve oro en forma de Au^{+1} o Au^{+3} y se forma una película pasivante de óxido, en la Fig. 1 de nuestro estudio observamos pasivación a 1.2 V. En HNO_3 hay evidencias [10] de disolución de Au^{+3} por encima de 1.0 V.

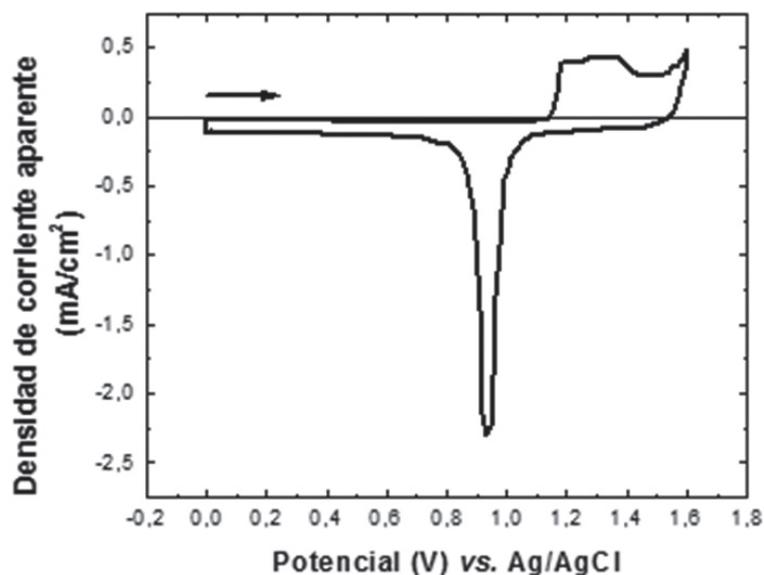


Figura 1. Voltamperograma sobre un electrodo de oro en solución de H_2SO_4 1.0 mol/dm³ desaireada. Velocidad de barrido: 100 mV/s.

Comparada con la Fig. 1, en la Figura 2 hay un cambio drástico en la forma del voltamperograma, aparece un pico de oxidación (pico 1) a 1.1 V, un hombro a 1.18 V, la corriente del pico de oxidación ha aumentado considerablemente y aparece un nuevo pico de reducción (pico 4) a 0.73 V. En medio de iones cloruros se forman los complejos AuCl_4^- y AuCl_2^- , siendo el complejo AuCl_4^- el más estable [9]. La mayoría de los investigadores sólo ha podido observar el proceso de oxidación de tres electrones [8,11] y no se ha encontrado evidencia para el proceso de oxidación de un electrón [8]. En nuestro laboratorio observamos que después de realizar varios voltamperogramas cíclicos entre 0.3 y 1.1 V a 100 mV/s sobre la misma solución, aumenta la concentración de Au (III) en la solución y disminuye la masa de oro del electrodo, lo cual sugiere que el pico 1 de la Fig. 2 se debe a la disolución de Au principalmente en forma de complejo AuCl_4^- . En experimentos adicionales comprobamos que la corriente de pico para el pico 4

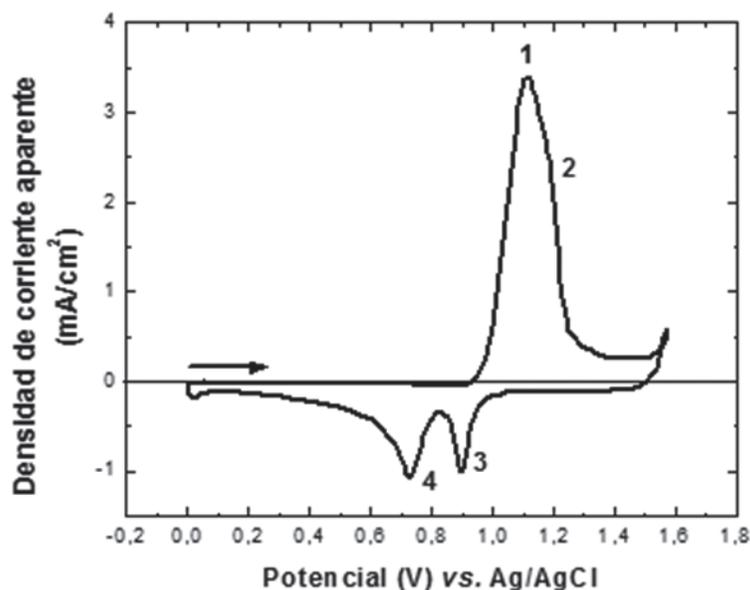


Figura 2. Voltamperograma de oro en H_2SO_4 0.1 mol/dm³ + HCl 1.0×10^{-2} mol/dm³. Velocidad de barrido: 50 mV/s.

(Fig. 2) se incrementa con la concentración de HAuCl_4 , por lo que el pico 4 debe corresponder a la reducción de AuCl_4^- y el pico 3 a la reducción de los óxidos de oro generados en el pico 2.

La Fig. 3 es análoga a la Fig. 2, en ella se ha aumentado la concentración de HCl . Se observa en la Fig. 3 desaparición del pico 3 e incremento en la altura de los picos anódicos y catódicos. Se observa adicionalmente un pico anódico en la dirección catódica (pico 5) que corresponde a la oxidación electroquímica de Au a AuCl_4^- a causa de la ruptura de la pasividad; entre mayor sea la altura del pico 5 mayor debe ser la altura del pico 4, el cual corresponde al proceso de reducción del AuCl_4^- hasta Au. En nuestro laboratorio evidenciamos que las alturas de los picos 5 y 4 aumentan con la concentración del ion cloruro, mientras que la del pico 3 en la Fig. 2 disminuye.

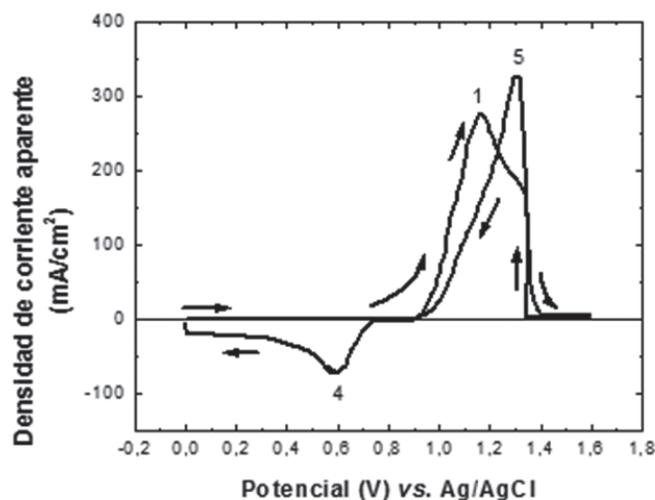


Figura 3. Voltamperograma cíclico de oro en H_2SO_4 0.5 mol/dm³ más HCl 0.5 mol/dm³. Velocidad de barrido: 50 mV/s.

3.2 Reducción de $HAuCl_4$ en solución acuosa de HCl 1.0 M

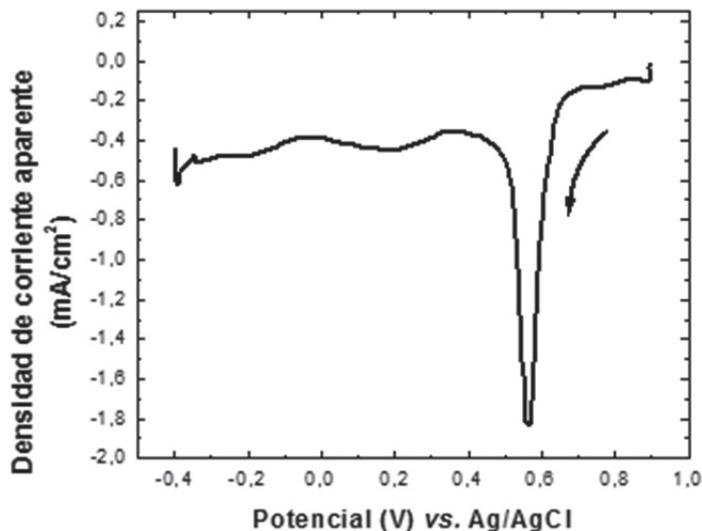


Figura 4. Voltamperograma de reducción de oro en solución de $HAuCl_4$. Concentración de oro: 80 ppm, velocidad de barrido: 100 mV/s, electrodo trabajo: RPG (área geométrica 0.02 cm²), tiempo de adsorción: 5 minutos a 0.9 V antes de empezar el barrido catódico.

La Figura 4 muestra un voltamperograma sobre grafito pirolítico rugoso (RPG) en una solución de $HAuCl_4$ con 80 ppm de oro, hay un pico de reducción a 0.56 V el cual aumenta con la concentración $HAuCl_4$ y debe corresponder a la reducción del complejo $HAuCl_4$ [13]. Una figura del logaritmo de la corriente de pico a 0.56 V, contra el logaritmo de la velocidad de barrido entre 10 y 100 mV/s mostró una pendiente de 0.8, lo cual sugiere que en el proceso de reducción participa el fenómeno de adsorción del complejo de oro sobre la superficie de grafito pirolítico rugoso. Una prueba adicional de la participación del fenómeno de adsorción en la reducción de $HAuCl_4$ sobre RPG se evidencia en la Fig. 5, en la cual se observa que a mayor tiempo de reposo del electrodo en la solución antes de empezar el barrido catódico mayor altura del pico de reducción. A 35 minutos la corriente de pico se hace constante

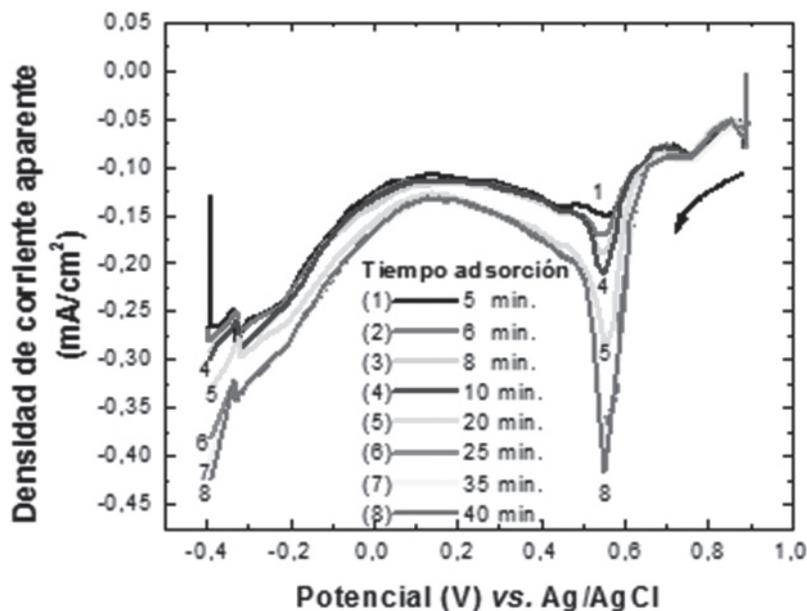


Figura 5. Voltamperogramas de reducción de oro en solución de $AuCl_3$. Concentración de oro: 3 ppm. El electrodo de trabajo permaneció sumergido en la solución a 0.9 V durante diversos tiempos (tiempo de adsorción) antes de iniciar el barrido catódico. Velocidad de barrido: 100 mV/s, electrodo trabajo: RPG (área geométrica 0.02 cm²).

indicando que el proceso de adsorción ha alcanzado el equilibrio. Usando electrodos de platino y carbono vítreo se realizaron curvas análogas a la representadas en las Figuras 4 y 5, con estos electrodos se observó una pobre definición del pico de oro en soluciones con 60 ppm de oro y velocidades entre 100 y 1000 mV/s.

Debido a que el electrodo de RPG mostró una mejor definición del pico de reducción de oro, se realizó usando este electrodo, una curva de corriente de pico

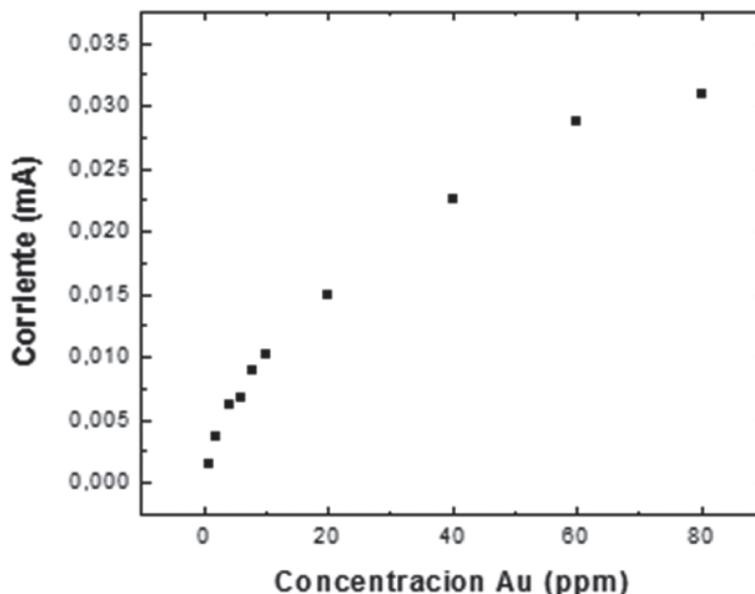


Figura 6. Curva de corriente de pico a 0.56 V (voltamperometría de barrido lineal) contra concentración para la reducción de oro en solución de $HAuCl_4$ en el rango entre 1 y 80 ppm de oro. Velocidad de barrido: 100 mV/s, electrodo de trabajo: RPG (área geométrica 0.02 cm²), tiempo de adsorción: 5 minutos a 0.9 V antes de empezar el barrido catódico.

a 0.56 V vs. concentración de oro para explorar la factibilidad de cuantificar voltamperométricamente oro en solución acuosa. Esta curva se realizó entre 1 y 80 ppm con un tiempo de adsorción de 5 minutos a un potencial de 0.9 V, antes de empezar el barrido. Los datos de esta curva están consignados en la Fig. 6. Se observa que la Fig. 6 no es lineal en el rango trabajado y que presenta baja sensibilidad por encima de 60 ppm.

3.3 Voltamperometría de redisolución anódica de barrido lineal

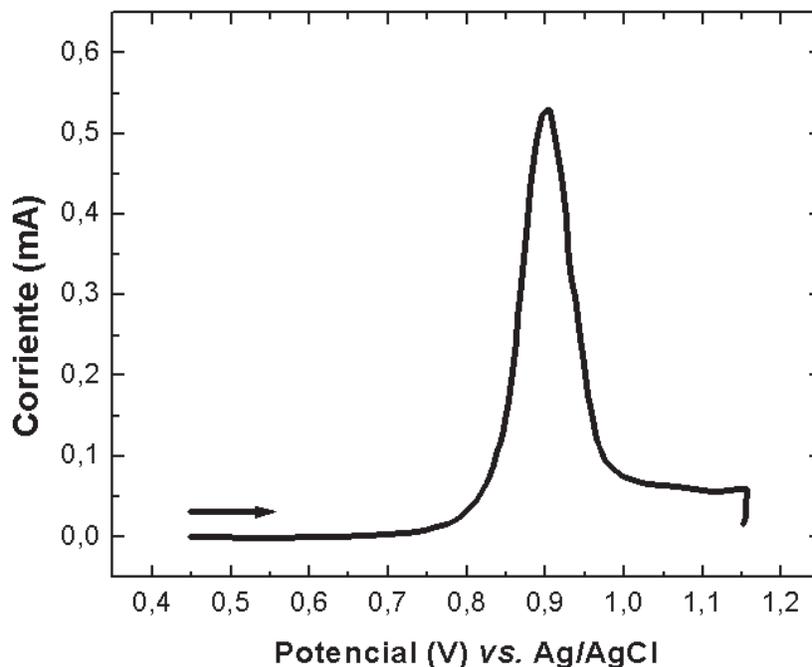


Figura 7. Voltamperograma de redisolución anódica de barrido lineal en solución de HAuCl_4 ; Concentración de oro: 20 ppm; velocidad de barrido: 100mV/s; tiempo de polarización: 4 min. (3 min. agitación y 1 min. de reposo) a un potencial de 0.45 V. Electrodo de trabajo: RPG (área geométrica 0.02 cm²).

La Fig. 7 es un voltamperograma de redisolución anódica de barrido lineal para oro en una solución de HAuCl_4 conteniendo 20 ppm de oro. Con el fin de estudiar la factibilidad de usar la técnica de redisolución anódica con electrodo RPG con fines cuantitativos, se realizó una curva corriente de pico-concentración, cada medida de la curva se efectuó por triplicado incluyendo el blanco. Los resultados se muestran en la Fig. 8, la cual se ajusta a la línea recta $I_p = -0.37 + 0.036 C$. El límite de detección (C_D) calculado mediante la fórmula [15] $C_D = kS_R / b$ es 6.17 ppm, siendo k una constante que tomamos como 3, S_R la desviación estándar de los residuos, la cual es 0.074 y b la pendiente. Entre 20 y 70 ppm de oro, la linealidad de la Fig. 8 es mejor que la de la Fig. 6. En la Fig. 7 el electrodeposición de oro se realizó a +0.45 V. A +0.45 V no se deposita paladio ni platino, lo cual fue comprobado contaminando la solución con H_2PdCl_4 y H_2PtCl_6 .

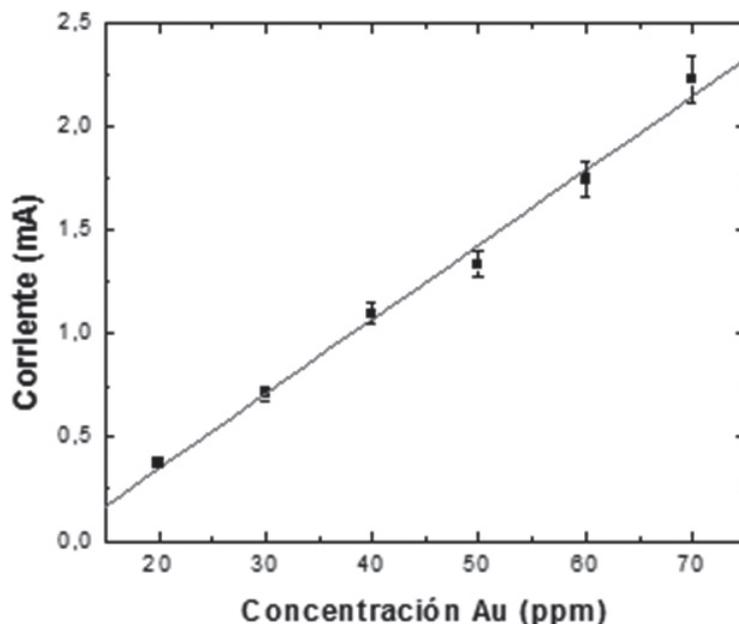


Figura 8. Corriente de pico contra concentración por voltamperometría de redisolución anódica de barrido lineal. Electrodo de trabajo: RPG, tiempo de polarización: 4 min a 0.45 V. Se ha realizado sustracción del blanco en la corriente.

Un lixiviado clorhídrico proveniente de la extracción de platino generalmente presenta concentraciones significativas no sólo de oro, también de paladio, por lo que es conveniente estudiar los procesos electroquímicos en presencia de paladio. El electrodeposición simultáneo de varios metales puede dar lugar a una aleación. El comportamiento voltamperométrico de aleaciones binarias de metales preciosos es en la actualidad un tema de gran interés y ha sido estudiado por Lukaszewski [17] (paladio-oro), Solla-Gullon [18] (platino-paladio) y Möller (platino-oro) [19] entre otros [20, 23]. El voltamperograma de barrido lineal a 50 mV/s para la redisolución de paladio proveniente de una solución de 20 ppm de H_2PdCl_4 en HCl 1.0 M, presentó un pico único a 0.40 V, con forma semejante al exhibido por oro en la Fig. 7. La Figura 9 es la unión de varios voltamperogramas de redisolución anódica para mezclas de oro y paladio a diferentes concentraciones. El depósito que originó la Fig. 9 se realizó a -0.28 V, a este potencial se deposita tanto oro como paladio. No tenemos una explicación totalmente satisfactoria para las curvas de la Fig. 9, pero podríamos aproximarnos a ella considerando que la superficie de grafito tiene depositado en forma no uniforme paladio, oro y aleación paladio-oro. En curva 1 de la Fig. 9, la composición de la solución inicial es Pd/Au = 10/1, la primera onda se debe a la oxidación de paladio, en la segunda onda la aleación se está oxidando de tal manera que el metal menos noble (paladio) sale preferencialmente de la aleación, la composición de la aleación cambia enriqueciéndose en oro a tal punto que en la tercera onda el oro y el paladio se disuelven en la misma proporción que se encuentran en la aleación. En las curvas 2 y 3 de la Fig. 9 la solución inicial tiene una proporción de oro mayor que la solución que originó la curva 1 por lo que de acuerdo a Kaiser [16] los potenciales de desalajo deben desplazarse hacia al potencial de oro puro.

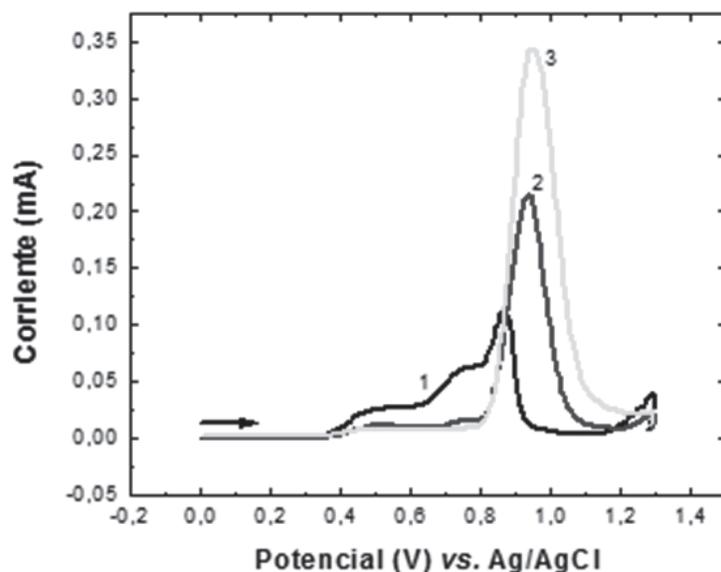


Figura 9. Voltamperogramas de redisolución anódica de paladio y oro. Velocidad de barrido: 100 mV/s, electrodo trabajo: RPG 0.02 cm², tiempo de polarización: 4 min. (3 min. agitación y 1 min. de reposo) a -0.28 V. Curva 1: 10 ppm Au + 100 ppm Pd. Curva 2: 50 ppm Au + 100 ppm Pd. Curva 3: 100 ppm Au + 50 ppm Pd.

De la Fig. 9 puede concluirse que al potencial al cual se deposita paladio también se deposita una aleación paladio-oro y el potencial de pico y la altura de pico dependen de la composición de la aleación. Las consecuencias de este hecho son importantes, pues no se puede confiablemente analizar paladio por voltamperometría de redisolución anódica en un sistema que contiene oro, pues al depositar el paladio se deposita simultáneamente oro, pero sí podría analizarse oro en presencia de paladio, pues se puede depositar oro a un potencial al cual no se deposita paladio.

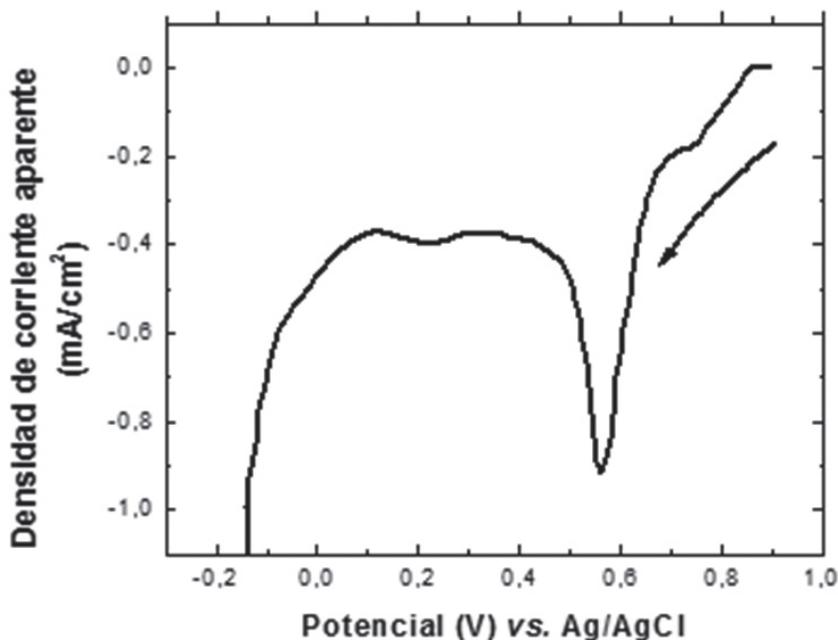


Figura 10. Voltamperograma sobre una mezcla de $\text{HAuCl}_4 + \text{H}_2\text{PdCl}_4 + \text{H}_2\text{PtCl}_6$. Concentración de oro, paladio y platino: 20 ppm cada uno. Velocidad de barrido: 100 mV/s. Electrodo de trabajo RPG (área geométrica 0.02 cm²). Tiempo de adsorción: 5 minutos a un potencial de 0.9 V.

La Figura 10, se refiere a una voltamperograma de barrido lineal catódico en un sistema que contiene oro, paladio y platino en disolución, puede verse que el paladio y el platino se depositan por debajo de 0 V. A +0.45 V se electrodeposita oro sin interferencia de paladio y platino, el voltamperograma de barrido lineal anódico de oro depositado a +0.45 V en presencia de paladio y platino tiene la forma de la Fig. 7.

Para verificar el uso potencial de nuestro estudio, se realizó voltamperometría de redisolución anódica sobre un lixiviado proveniente de la extracción de platino en la empresa PMG de Colombia, el lixiviado fue diluido 850/8 veces con HCl 0.1 molar antes de realizar el análisis, la curva de redisolución de oro mostró el comportamiento de la Fig. 7, el contenido de oro en el lixiviado fue de 1.4×10^2 ppm, valor comparable al encontrado por absorción atómica de 130 ppm.

Conclusiones

En solución acuosa de ácido sulfúrico conteniendo iones cloruros ocurre disolución de oro a 1.1 V (vs. Ag/AgCl, sat.). En el proceso de reducción de HAuCl_4 en HCl 1M sobre grafito pirolítico rugoso (RPG) participa la adsorción de AuCl_4^- sobre la superficie RPG. La voltamperometría de redisolución anódica puede aplicarse a la cuantificación de oro en lixiviados clorhídricos conteniendo paladio.

Referencias bibliográficas

- [1] Free base Ammonium Hexachloroplatinate facts, 2009, (18 nov. 2009). http://www.freebase.com/view/en/ammonium_hexachloroplatinate.
- [2] Barakat, M.A., Mahmoud, M.H.H., 2004. Recovery of platinum from spent catalyst. *Hydrometallurgy* 72, 179-184
- [3] Rosado, O. M de J., 2006. Aplicación de materiales nanoestructurados en celdas de combustible como una fuente alterna de energía. Cancún, Quintana Roo, México. Trabajo de Grado (Ingeniero Electromecánico). Instituto Tecnológico de Cancún.
- [4] Hoyos, J. A., Patiño, R. L., 2001. Construcción de un Sistema Electroquímico Bipotenciostático. Santiago de Cali. Trabajo de grado (Ingeniero Electrónico). Universidad del Valle. Colombia, Facultad de Ingeniería.
- [5] Pourbaix, M., 1966. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. New York: Pergamon Press, pp. 399-405.
- [6] Tian, M., Pell, W.G., Conway B.E., 2003. Nanogravimetry study of the initial stages of anodic surface oxide film growth at Au in aqueous HClO_4 and H_2SO_4 by means of EQCN. *Electrochem. Acta* 48, 2675- 2689.
- [7] Burke, L.D., Nugent, P.F., 1977. The electrochemistry of gold: I the redox behavior of the metal in aqueous media. *Gold Bulletin* 30 (2), 43-53.

- [8] Hoare, J. P., 1984. A cyclic voltammetric study of the gold–oxygen system. *J. Electrochem. Soc.* 131 (8), 1808-1815.
- [9] Ye, S., Ishibashi, C., Shimazu, K., Uosaki, K., 1998. An in situ electrochemical Quartz crystal microbalance study of a dissolution process of a gold electrode in perchloric acid solution containing chloride ion. *J. Electrochem. Soc.* 145 (5), 1614-1623.
- [10] Strehblow, H. H., 1995. Mechanisms of pitting corrosion. In: Marcus, P., Oudar, J (Eds.), *Corrosion Mechanism in Theory and Practice*. New York: Marcel Dekker, Inc, pp. 201-237.
- [11] Gallego, J.H., Castellano C.E., Calandra A.J., Arvia, A.J.J., 1975. The electrochemistry of gold in acid aqueous solutions containing chloride ions. *J. Electroanal. Chem.* 66, 207-230.
- [12] Shackelford, S.G.D., Boxall, C., Port S.N., Taylor R.J., 2002. An in situ electrochemical quartz crystal microbalance study of polycrystalline gold electrodes in nitric acid solution. *J. Electroanal. Chem.* 538-539, 109-119.
- [13] Schmidt, U.C., Osteryoung, J. G., 1997. Reduction of gold in concentrated LiCl. *J. Electrochem. Soc.* 144(9), 3091-3095.
- [14] Bard, A. J.; Faulkner, L.R., 2001. *Electrochemical Methods*. John Wiley & Sons: New York, p.591.
- [15] Sandoval, J. 2001, *Estadística Básica Aplicada al Análisis Instrumental*. Universidad del Valle, Cali. Departamento de Química, p.59-74.
- [16] Kaiser, H., 1987. Alloy dissolution. In: Florian, M. (Editor), *Corrosion mechanisms*, New York: Marcel Dekker, inc. p 85-95.
- [17] Lukaszewski, M., Czerwinski, A., 2003. Electrochemical behavior of palladium-gold alloys. *Electrochim. Acta* 48, 2435-2445.
- [18] Solla-Gullon, J., Montiel, V., Aldaz, A., Clavilier, J., 2002. Electrochemical and electrocatalytic behavior of platinum–palladium nanoparticle alloys. *Electrochem. Commun.* 4, 716-721.
- [19] Möler H., Pistorius, P.C., 2004. The electrochemistry of gold–platinum alloys. *J. electroanal. Chem.* 570, 243-255.
- [20] Cerovic, K., Hutchison, H., Sanderbergh, R.F., 2005. Kinetics of gold and a gold–10% silver alloy dissolution in aqueous cyanide in the presence of lead. *Minerals Engineering* 18, 585-590
- [21] Greeley, J., Nørskov, J.K., 2007. Electrochemical dissolution of surface alloys in acids: Thermodynamic trends from first-principles calculations. *Electroquímica Acta* 52, 5829-5836.
- [22] Joska, L., Poddana, M., Leitner, J., 2008. Corrosion behavior of palladium–silver–copper alloys in saliva. *Dental Materials* 24, 1009-1016.
- [23] Bocarmé, T.V., Moors, M., Kruse, N., Atanasov, I.S., Hou, M., Cerezo, A., Smith G.D.W., 2009. Surface segregation of Au–Pd alloys in UHV and reactive environments: Quantification by a catalytic atom probe. *Ultramicroscopy* 109, 619-624.
- [24] Mott, D., Luo, J., Njoki, P.N., Lin, Y., Wang, L., Zhong, C.J., 2007. Synergistic activity of gold-platinum alloy nanoparticle catalysts. *Catalysis Today* 122, 378-385.

Dirección de los autores

Julietth Abadía López

Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

julietthabadialopez@gmail.com

Claudia Lorena Pérez Valdés

Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

claperez16@hotmail.com

Mario Grajales Tamayo

Departamento de Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia

magrajal@gmail.com