

Hacia un futuro sin cianuro en la extracción de oro

Towards a future without cyanide in gold extraction

*Leticia Lozada-Rodríguez**

Universidad Autónoma de Zacatecas, México

leticialozada@uaz.edu.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-8155-685X>

Recepción: 30 de enero de 2025

Aprobación: 23 de abril de 2025



Sara A. Cortes-Llamas

Universidad de Guadalajara, México

sara.cortes@academicos.udg.mx

 <https://orcid.org/0000-0003-3007-6498>

RESUMEN

Se ofrece al lector un panorama general de los compuestos empleados en la lixiviación del oro, el cual está enfocado principalmente en las alternativas que no utilizan cianuro y que resultan menos tóxicas para el humano y más amigables con el medioambiente. Para ello, se realizó la búsqueda bibliográfica correspondiente. Se concluye que a pesar de que existen varias alternativas no cianuradas para la lixiviación aún no logran ser tan eficientes como el cianuro. Esto abre un gran campo para la investigación de nuevos compuestos que logren extraer oro de forma eficiente, no sean tóxicos y no representen un riesgo medioambiental.

PALABRAS CLAVE: lixiviación, oro, sin cianuro, sustentabilidad.

ABSTRACT

This work aims to provide the reader with a general overview of the compounds used in gold leaching, focused mainly on alternatives that do not use cyanide and that are less toxic to humans and more friendly to the environment. For this, the corresponding bibliographic search was carried out. It is concluded that although there are several non-cyanide alternatives for leaching, they are still not as efficient as cyanide. This opens a great field for the research of new compounds that can extract gold efficiently, are not toxic, and do not represent environmental risk.

KEYWORDS: leaching, gold, non-cyanide, sustainability.

INTRODUCCIÓN

El oro presenta propiedades físicas y químicas que lo han convertido en uno de los metales más apreciados por la humanidad desde su descubrimiento. Es blando, dúctil y maleable. No se corroe o reacciona con la humedad, no se oxida en condiciones normales de presión y temperatura ni es afectado por ácidos comunes, como ocurre con otros metales. Posee una alta conductividad térmica y eléctrica (McCracken, 2000). Ha sido objeto de artefactos históricos y obras de arte, además de cumplir un papel fundamental en el desarrollo tecnológico. Es uno de los metales con mayor valor monetario y es comerciable.

Incentivado por todos estos atributos, el hombre siempre ha buscado la forma de extraer y beneficiar oro. Sin embargo, los procesos que hasta hoy en día se llevan a cabo están basados en el uso de sustancias de alta toxicidad como el cianuro, lo cual representa un riesgo para la salud y para el medioambiente. Así pues, la obtención de oro mediante procesos eficientes, económicos y no dañinos a la salud y al medioambiente ha sido en los últimos años un objetivo por alcanzar.

*AUTORA PARA CORRESPONDENCIA

leticialozada@uaz.edu.mx

A continuación, se describen las etapas de un proceso general de extracción de oro, en donde la lixiviación es la etapa medular. Al respecto, este artículo se enfoca en la descripción general de los principales reactivos no cianurados que se utilizan en la etapa de lixiviación, con sus ventajas y desventajas, las características químicas de un buen lixiviante, así como una nueva propuesta bajo estudio.

1. EXTRACCIÓN DE ORO

Los métodos de extracción de oro dependerán de la forma en la que se halla en la naturaleza. En algunas ocasiones, el oro se encuentra como metal libre, por ejemplo en el agua de mar o en ríos, donde simplemente suele concentrarse por gravedad (McCracken, 2000). Sin embargo, la mayor cantidad de oro se obtiene a partir de minerales, donde se localiza asociado con algún otro elemento. Por ejemplo, cuando el oro se encuentra dentro de minerales carbonáceos, de sulfuros o telururos (minerales refractarios), en un proceso común de extracción (figura 1), es posible distinguir de manera general las siguientes etapas (Marsen y House, 2006):

a) Pretratamiento oxidativo. En este proceso se oxidan los minerales, por lo que se deja al oro más libre y susceptible para su extracción. Por ejemplo, la tostación es un proceso pirometalúrgico para producir óxido férrico poroso, el cual permite que las soluciones lixiviantes tengan un mejor acceso a las partículas de oro atrapadas en el mineral.

b) Lixiviación. Es la disolución de oro en una solución acuosa, donde el oro metálico $\text{Au}(0)$ pasa a $\text{Au}(\text{I})$ y $\text{Au}(\text{III})$. En este proceso es necesario que el oro se oxide y sea estabilizado por un ligante (ion o molécula que se une a un metal, por ejemplo cianuro) para así formar un complejo (compuesto metal-ligante) soluble en agua. La cianuración es el proceso empleado en el ámbito industrial desde 1889 para la lixiviación de oro.

c) Purificación y concentración. Las soluciones lixiviadas contienen bajas concentraciones de oro. Para concentrarlas, se utiliza carbón activado o resinas de intercambio iónico, las cuales adsorben al oro lixiviado. Posteriormente, el oro se desorbe a un volumen menor de solución, el cual es apto para la recuperación.

d) Recuperación. Se logra con procesos reductivos que pasan las especies de oro, $\text{Au}(\text{I})$ y $\text{Au}(\text{III})$ hacia $\text{Au}(0)$. Esto se consigue mediante la precipitación con zinc (cementación). También se utilizan procesos de electrodeposición para la recuperación de oro.

e) Refinación. Es la parte del proceso donde se mejora la calidad del oro dependiendo de los requerimientos finales; por ejemplo, se requiere de una pureza de 99.6% para su uso en joyería.



FIGURA 1

Proceso general para la extracción de oro a partir de minerales

Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, en las últimas décadas se ha empleado una gran cantidad de oro en la industria electrónica. La gran demanda de oro a nivel mundial hace que su recuperación a partir de chatarra electrónica sea importante. Los procesos de lixiviación que se emplean para la recuperación de oro en la basura electrónica están basados en los sistemas típicos de extracción de dicho metal a partir de sus minerales (Syed, 2012).

2. LIXIVIACIÓN, EL PROCESO MEDULAR EN LA EXTRACCIÓN DEL ORO

Dentro de las etapas de la extracción de oro, la lixiviación es un punto clave para lograr su recuperación exitosa. En este proceso hidrometalúrgico, el Au(0) del mineral se transforma en complejos de Au(I) y/o Au(III) estables y solubles en agua para su posterior recuperación. Para conseguirlo, se requiere de la presencia de un agente oxidante que sea capaz de pasar al Au(0) hacia Au(I) y/o Au(III), así como de un ligante que lo estabilice y forme sus complejos (figura 2). En la cianuración el oxígeno disuelto en el agua actúa como agente oxidante, mientras que el oro actúa como agente reductor estabilizándose con los ligantes ciano (CN^-) que encuentra en su entorno.

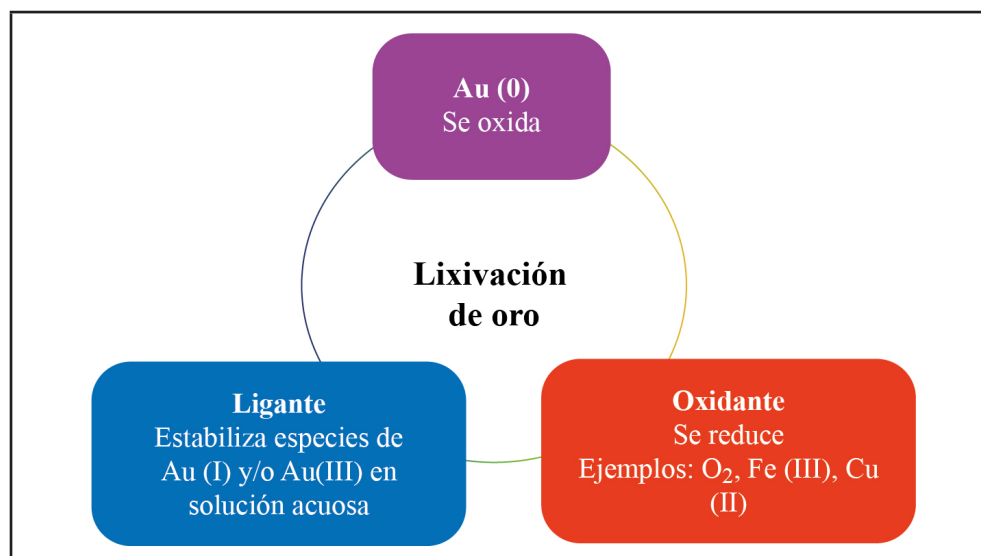


FIGURA 2

Requisitos para la lixiviación de oro

Fuente: elaboración propia.

La estabilidad de los ligantes y de sus complejos con oro es determinante en el éxito de la lixiviación (Senanayake, 2004). Un ligante será un buen agente acomplejante si presenta una constante de equilibrio grande y un potencial de reducción estándar (E°) bajo. El cuadro 1 enlista los principales ligantes utilizados para la lixiviación de oro, las constantes de estabilidad (β_2 o β_4) de sus complejos, así como sus potenciales de reducción. A partir de esta información es posible entender por qué el cianuro resulta tan eficiente en la lixiviación de oro.

CUADRO 1

Constantes de estabilidad y potenciales de reducción estándar para complejos de oro a 25 °C

Ligante	Complejo formado	$\log \beta_2$ o $\log \beta_4$	$E^\circ [\text{Au(I/III)/Au(0)}]/$ (V vs. SHE)
CN^-	Au(CN)_2^-	38.3	-0.57
$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	$\text{Au(S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$	28.7	0.17
$\text{CS(NH}_2)_2$	$\text{Au(NH}_2\text{CSNH}_2)_2^+$	23.3	0.38
Cl^-	AuCl_2^-	9.1	1.11
	AuCl_4^-	25.3	1.00
Br^-	AuBr_2^-	12	0.98

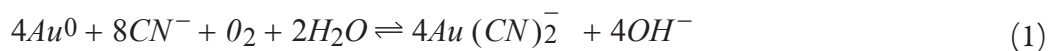
CUADRO 1 (continuación)
Constantes de estabilidad y potenciales de reducción estándar para complejos de oro a 25 °C

Ligante	Complejo formado	$\log \beta_2$ o $\log \beta_4$	$E^\circ [\text{Au(I/III)}/\text{Au(0)}]/$ (V vs. SHE)
	AuBr_4^-	32.8	0.97
I^-	AuI_2^-	18.6	0.58
	AuI_4^-	47.7	0.69
HS^-	Au(SH)_2^-	29.9	-0.25
NH_3	$\text{Au(NH}_3)_2^+$	13	0.57
Glicinato	$\text{Au(NH}_2\text{CH}_2\text{COO)}_2^-$	18	0.632
SCN^-	Au(SCN)_4^-	17.1	0.66
	Au(SCN)_4	43.9	0.66
SO_3^{2-}	$\text{Au(SO}_3)_2^{3-}$	15.4	0.77

Fuente: adaptado de Aylmore, 2016.

2. 1. Cianuración

Hasta el día de hoy, y desde que fue patentada por MacArthur y Forrest, la cianuración (reacción 1) ha sido empleada a nivel industrial para la lixiviación de oro (Habashi, 1967).



Más del 90% de la extracción de este metal se basa en el uso de cianuro debido a su alta efectividad y bajo costo (Mudder y Botz, 2004). Sin embargo, el cianuro presenta elevada toxicidad (Hilson y Monhemius, 2006; Rice *et al.*, 2018); la concentración letal media (CL₅₀) en humanos de HCN y de KCN es de 1.1 y <5 mg/kg, respectivamente (Muderawan *et al.*, 2023). Esto representa un elevado riesgo a la salud de los trabajadores de esta industria, así como para el medioambiente (Sun *et al.*, 2017). Por consiguiente, se lleva a cabo investigación continua en búsqueda de algún ligante (agente lixivante) alternativo al cianuro.

2. 2. Sistemas de lixiviación sin cianuro

El principal desafío para encontrar un agente lixivante que sustituya al cianuro consiste en garantizar que los procesos hidrometalúrgicos seleccionados para la extracción de oro coincidan con las características del mineral y formen complejos estables y solubles en agua con relativa rapidez. Adicionalmente, el agente lixivante debería ser de bajo costo, reciclable, selectivo hacia oro, no tóxico y compatible con los demás procesos de recuperación (Hilson y Monhemius, 2006).

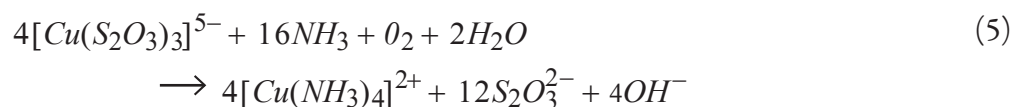
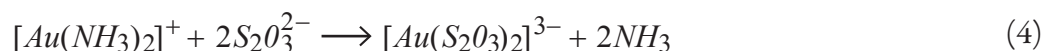
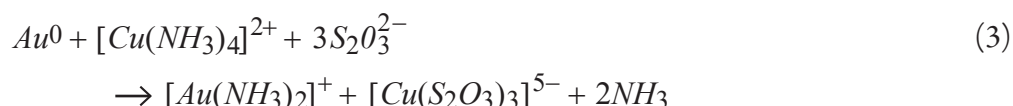
Durante las últimas décadas se han estudiado más de 25 sistemas diferentes de lixiviación alternos al cianuro, en el cuadro 1 se muestran los más comunes (Aylmore, 2016). Dentro de estos sistemas, los que utilizan tiosulfato, tiourea y halógenos, así como sus posibles variantes, son los más prometedores hasta el momento. Únicamente, se ha reportado en el ámbito industrial el uso de tiosulfato en minas de Australia y tiourea en Estados Unidos (Zhang *et al.*, 2022).

2. 2. 1. Lixiviación con tiosulfato

El desarrollo de un proceso industrial eficiente basado por completo en el tiosulfato aún no ha sido posible debido al alto costo que provoca su consumo, que es ocasionado por la inherente oxidación del tiosulfato (Senanayake, 2012). A pesar de lo anterior, este ligante ha demostrado ser capaz de disolver oro de manera eficaz (reacción 2).



Aunque el tiosulfato puede lixiviar oro utilizando oxígeno como agente oxidante, lo hace muy lentamente. Por tal motivo, se requiere de un agente oxidante adecuado, tal como Cu(II) o Fe(III) y un estabilizador para dicho oxidante, por ejemplo amoníaco, una poliamina de cadena abierta para el cobre u oxalato para el hierro (Xie *et al.*, 2021). Las reacciones que describen el proceso de lixiviación de oro en un sistema de tiosulfato con amoníaco catalizado con cobre son:



Esta serie de reacciones corresponden al proceso total de disolución descrito por la reacción (2). La presencia del amoníaco es necesaria para estabilizar al Cu(II) en solución (en forma del complejo $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$, que es la especie catalítica) para prevenir la formación de $Cu(OH)_2$ y evitar la pasivación de la superficie del oro. Hasta cierto punto, la velocidad de disolución depende de la concentración de tiosulfato y Cu(II). La concentración de amoníaco no tiene impacto en la velocidad, pero sí en la efectividad del sistema lixivante (Marsden e Iain House, 2006).

2. 2. 2. Lixiviación con tiourea

La tiourea es capaz de disolver metales pesados, además del oro y la plata, lo que hace que presente problemas ambientales similares a los que aparecen con el uso de cianuro. Es menos tóxica que el cianuro, con una DL_{50} de 10 g/kg (Li *et al.*, 2023), pero se oxida y consume con rapidez en las condiciones requeridas para la lixiviación, sobre todo si no se tiene control del potencial o no se limita la presencia de oxidantes, por lo que dicho proceso presenta costos elevados. La lixiviación con tiourea ocurrirá a una velocidad técnicamente aceptable solo si el potencial de la solución es más grande que 0.5 V. En consecuencia, el aire o el oxígeno no son oxidantes apropiados y se deben utilizar oxidantes más fuertes como Fe(III), peróxido de hidrógeno u ozono a fin de lograr una adecuada extracción de oro (Marsden y House, 2006). La reacción global de disolución de oro con tiourea es:



La velocidad de lixiviación de la tiourea es mayor que la que presenta la cianuración (Li y Miller, 2006). También, se han estudiado sistemas donde la tiourea, en sinergia con el tiocianato, se emplean como agentes lixiviantes alternos (Yang *et al.*, 2011).

2. 2. 3. Otros lixiviantes

Los sistemas lixiviantes con halógenos son capaces de disolver el oro con rapidez. Previo a la aparición de la cianuración, ya se recurría a soluciones con cloruros para la disolución de oro, por ejemplo agua regia (solución de ácidos concentrados $\text{HNO}_3:\text{HCl}$, 1:3 v/v). Con ligantes cloruro, el oro forma complejos $[\text{AuCl}_2]^-$ y $[\text{AuCl}_4]^-$, donde la especie de Au(III) es la más estable (Marsden e Iain House, 2006). Sistemas que involucran yoduro/ yodo (Baghalha, 2012), cloruro/hipoclorito (Baghalha, 2007), cloro gas (Nesbitt *et al.*, 1990) y bromuro (Sousa *et al.*, 2018), entre otros, también han sido estudiados (Ilyas y Lee, 2018).

Por otro lado, el oro es soluble en una solución acuosa amoniacal con la presencia de un agente oxidante adecuado, tal como oxígeno, hipoclorito, peróxido de hidrógeno o bromo (Marsden e Iain House, 2006).

Algunos sistemas que resultan de gran interés son los que utilizan microorganismos. Por ejemplo, aquellos que producen cianuro para una lixiviación *in situ* (Zammit *et al.*, 2012). Otros sistemas biogénicos utilizan yodo, triyoduro o compuestos orgánicos como aminoácidos en la lixiviación del oro (Jorjani y Askari Sabzkoohi, 2022) en un proceso conocido como *biolixiviación* (Maluckov, 2021).

En la tabla 1 se presentan las principales ventajas y desventajas de los sistemas de lixiviación más estudiados.

TABLA 1
Ventajas y desventajas de los lixiviantes no cianurados

Lixivante	Ventajas	Desventajas
Tiourea	La velocidad de lixiviación es rápida comparada con la de la cianuración. Se puede emplear en varios tipos de minerales: los ricos en plata, los que son pretratados por oxidación biológica o prensados en caliente	Es relativamente cara e inestable, ya que requiere de un alto consumo. La lixiviación en medio ácido necesita de equipo anticorrosivo y, por tanto, un mayor costo. La tiourea es un posible carcinógeno
Halógenos	Cinética de lixiviación rápida en comparación al proceso de cianuración. Alta adaptabilidad para diferentes minerales, que pueden usarse en los refractarios, especialmente en los que contienen óxidos de hierro donde el oro está encapsulado	Son caros. El yodo es volátil, por lo cual es fácil que se pierda durante la lixiviación. Las condiciones ácidas hacen que sea necesario el uso de equipo anticorrosivo
Tiocianato	El proceso presenta una cinética relativamente rápida comparada con la de la cianuración. El radio de lixiviación de oro es considerablemente alto	La estabilidad del tiocianato es baja y se oxida a sulfato, carbonato e iones amonio. Algunos minerales que contienen sulfuros pueden catalizar su descomposición y causar un mayor consumo de reactivo. Es tóxico y presenta un riesgo medioambiental. También se requiere equipo anticorrosivo debido a las condiciones ácidas en las que se lleva a cabo
Polisulfuros	Rápida velocidad de lixiviación respecto a la cianuración y radio alto de extracción de oro en soluciones alcalinas. Son eficientes para tratar minerales de baja concentración de oro, tales como los que contienen As y Sb	Los polisulfuros son inestables y se descomponen con facilidad a gases como sulfuro de hidrógeno y amoníaco, de olor irritante, lo cual lleva a una contaminación ambiental. Se requiere gran cantidad (concentraciones >40%), lo que incrementa el costo
Tiosulfato	Es amigable con el ambiente y barato. La lixiviación se lleva a cabo más rápido que en la cianuración. Los minerales que contienen Cu, As, Sb o carbón pueden tratarse eficientemente con mejores recuperaciones que en la cianuración	El tiosulfato se oxida con facilidad por oxidantes como el Cu(II), lo que hace que su consumo sea mayor. Una vez lixiviado, es difícil recuperar el oro de forma eficiente de las soluciones

Fuente: adaptado de Zhang *et al.*, 2022.

2. 2. 4. Carbenos *N*-heterocíclicos, agentes lixiviantes bajo investigación

Debido a la importancia de la interacción metal-ligante en la estabilidad de cualquier complejo, y la relación que esto tiene con el desarrollo de un buen proceso de lixiviación, es necesario proponer y probar nuevos ligantes para la disolución de oro.

Los carbenos *N*-heterocíclicos (NHC) son ligantes con una gran habilidad para unirse a los metales, lo que ha hecho posible que se obtengan sus complejos con la mayoría de los metales de la tabla periódica (Molina-Paredes *et al.*, 2024).

La estabilidad de los complejos de oro con ligantes NHC y la relativa sencillez de preparación se ha visto reflejada en los numerosos reportes de este tipo de complejos (Nolan, 2011). A pesar de esto, se conocen pocos estudios de lixiviación con ligantes tipo carbeno; por ejemplo, se observó que algunos ligantes NHC forman sus correspondientes complejos de Au(I) a partir de Au(0) en una solución de acetonitrilo, Cu(II) y amoníaco acuoso, que llevan a cabo un proceso de lixiviación (figura 3) (Lozada-Rodríguez *et al.*, 2017).

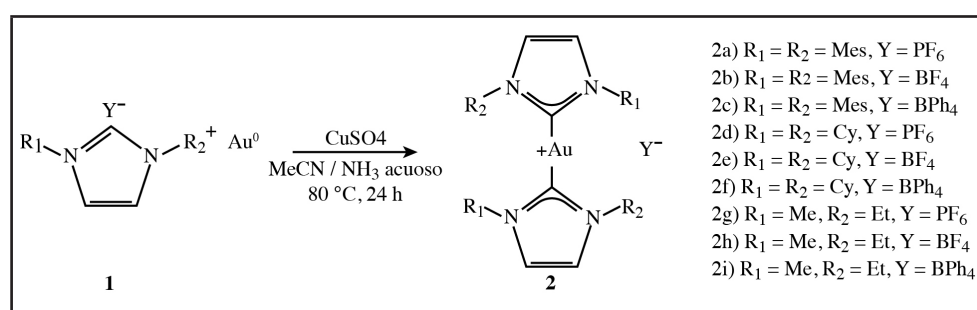


FIGURA 3

Síntesis de complejos catiónicos bis(NHC)-Au(I) a partir de oro metálico y sales de imidazolio

Fuente: adaptado de Lozada-Rodríguez *et al.*, 2017.

Por otro lado, el 1,3-dimetilimidazolio-2-carboxilato, conocido como *carbeno enmascarado*, es sabido que se descarboxila en disolventes orgánicos apróticos y bajas cantidades de agua (Denning y Falvey, 2014) y genera *in situ* un carbeno-NHC, el cual puede unirse a metales presentes en el medio. Molina-Paredes *et al.* (2024) emplean este proceso para la lixiviación del oro; utilizando 1,3-dimetilimidazolio-2-carboxilato y CuI en acetonitrilo, lograron la formación de complejos biscarbénicos de oro $[\text{Au}(\text{MeNHC})_2]^+$ (figura 4); esta reacción heterogénea solo es posible a través de la formación *in situ* de un complejo Cu-NHC, el cual transfiere el ligante NHC al Au(0). Esta metodología evita el uso de agentes oxidantes agresivos y ligantes tóxicos, así como tampoco requiere de un medio ácido o básico. Esta reacción muestra el potencial de desarrollar en un futuro métodos más amigables con el medioambiente.

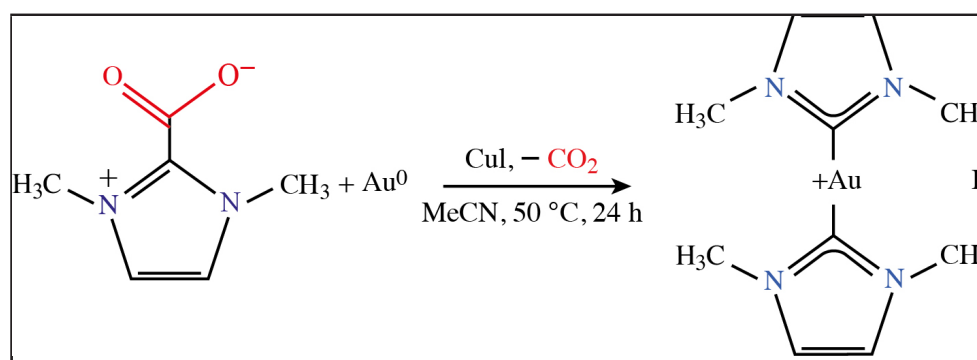


FIGURA 4

Síntesis de complejos catiónicos bis(NHC)-Au(I) a partir de oro metálico y un carbeno NHC enmascarado

Fuente: adaptado de Molina-Paredes *et al.*, 2024.

PROSPECTIVA

La extracción de oro es una actividad económica de gran relevancia. Tener procesos de lixiviación que lleven a cabo dicha extracción de manera segura, económica y con respeto al medioambiente es siempre un objetivo deseable. Desafortunadamente, hasta el día de hoy, ningún agente lixivante ha podido superar al cianuro en la extracción de oro.

El estudio de la química de coordinación del oro puede dar paso a la obtención de nuevos compuestos que sirvan como agentes lixivantes eficientes y que estén alineados con los principios de la química verde. En este sentido, es necesario explorar nuevos ligantes que permitan la formación de complejos de oro, estables y solubles en agua, con velocidades de reacción rápidas y que sean de bajo costo. En un intento de proponer nuevos ligantes, se investigan en la actualidad los carbenos NHC como posibles agentes lixivantes (Lozada-Rodríguez *et al.*, 2017; Molina-Paredes *et al.*, 2024). Aunque hoy en día estos sistemas representan una opción más costosa que los ya implementados en la extracción del oro, abren la posibilidad de usar los ligantes NHC en la extracción del oro; los ligantes NHC muestran una afinidad más fuerte hacia metales como Au y Pt que hacia los abundantes metales de la primera serie de transición, lo cual sería el punto clave para obtener procesos selectivos en la extracción de metales preciosos. Referente a esto, el campo de investigación para obtener procesos de extracción de oro más sustentables es amplio.

CONCLUSIONES

En este escrito se presentaron los agentes lixivantes alternos al cianuro más estudiados hasta el momento para la extracción de oro. Se entiende que, a pesar de que algunos de estos ligantes presentan velocidades de lixiviación más rápidas que el cianuro, que son más selectivos hacia oro o, incluso, que se adaptan mejor a distintos minerales refractarios, no han logrado superar al cianuro en la extracción de oro, sobre todo por factores económicos. Por lo tanto, sigue existiendo la necesidad de obtener nuevos ligantes que sirvan de forma eficiente, no tóxica y económica para la extracción de oro. En este sentido, aún hay mucho trabajo de investigación por realizar con el fin de acercarnos, cada vez más, a un futuro sin cianuro en la extracción de oro.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los árbitros que a través de sus observaciones aportaron una mejora a la estructura del artículo.

REFERENCIAS

- Aylmore, M. G. (2016). Alternative lixiviants to cyanide for leaching gold ores. *In Gold Ore Processing* (pp. 447-484). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63658-4.00027-X>
- Baghalha, M. (2007). Leaching of an oxide gold ore with chloride/hypochlorite solutions. *International Journal of Mineral Processing*, 82(4), 178-186. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2006.09.001>
- Baghalha, M. (2012). The leaching kinetics of an oxide gold ore with iodide/iodine solutions. *Hydrometallurgy*, 113-114, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.013>
- Denning, D. M., & Falvey, D. E. (2014). Solvent-Dependent Decarboxylation of 1,3-Dimethylimidazolium-2-Carboxylate. *The Journal of Organic Chemistry*, 79(10), 4293-4299. <https://doi.org/10.1021/jo5007575>
- Habashi, F. (1967). *Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution*. Butte: Montana College of Mineral Science and Technology.

- Hilson, G., & Monhemius, A. J. (2006). Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production*, 14(12-13), 1158-1167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.005>
- Ilyas, S., & Lee, J. (2018). *Gold Metallurgy and the Environment*. Boca Raton: CRC Press.
- Jorjani, E., & Askari Sabzkoochi, H. (2022). Gold leaching from ores using biogenic lixiviants – A review. *Current Research in Biotechnology*, 4, 10-20. <https://doi.org/10.1016/j.crbiot.2021.12.003>
- Li, J., & Miller, J. D. (2006). A review of gold leaching in acid thiourea solutions. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 27(3), 177-214. <https://doi.org/10.1080/08827500500339315>
- Li, K., Li, Q., Zhang, Y., Liu, X., Yang, Y., & Jiang, T. (2023). Improved thiourea leaching of gold from a gold ore using additives. *Hydrometallurgy*, 222, 106204. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106204>
- Lozada-Rodríguez, L., Pelayo-Vázquez, J. B., Rangel-Salas, I. I., Alvarado-Rodríguez, J. G., Peregrina-Lucano, A. A., Pérez-Centeno, A., López-Dellamary-Toral, F. A., & Cortes-Llamas, S. A. (2017). From metallic gold to $[\text{Au}(\text{NHC})_2]^+$ complexes: an easy, one-pot method. *Dalton Transactions*, 46(12), 3809-3811. <https://doi.org/10.1039/C7DT00322F>
- Maluckov, B. S. (2021). Biorecovery of nanogold and nanogold compounds from gold-containing ores and industrial wastes. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 105(9), 3471-3484. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11277-z>
- Marsden, J. O., & Iain House, C. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2nd. ed.). Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2nd. ed.). Littleton: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.
- McCracken, D. (2000). *Gold Mining in the 21st Century*. Chatsworth: Keene Engineering Co.
- Molina-Paredes, A. A., Rubio, J. E., Flores-Moreno, R., Rivera, C., Sánchez-Castro, L. A., Luna-Valle, E., Rangel-Salas I. I., Peregrina-Lucano, A., Alvarado-Rodríguez J. G.,... & Cortés-Llamas, S. A. (2024). Toward elemental gold leaching: Synthesis of Au–NHC complexes from a masked NHC precursor. *Inorganica Chimica Acta*, 576, 122454. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2024.122454>
- Mudder, T. I., & Botz, M. M. (2004). Cyanide and society : a critical review. *The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection*, 4(1), 62-74.
- Muderawan, I. W., Karyasa, I. W., Tika, I. N., & Beni Widana, G. A. (2023). Chemistry and Biology of Cyanides: A Literature Review. *Indonesian Journal of Chemistry and Environment*, 6(2), 63-82. <https://doi.org/10.21831/ijocce.v6i2.67030>
- Nesbitt, C. C., Milosavljevic, E. B., & Hendrix, J. L. (1990). Determination of the mechanism of the chlorination of gold in aqueous solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 29(8), 1696-1700. <https://doi.org/10.1021/ie00104a019>
- Nolan, S. P. (2011). The Development and Catalytic Uses of N-Heterocyclic Carbene Gold Complexes. *Accounts of Chemical Research*, 44(2), 91-100. <https://doi.org/10.1021/ar1000764>
- Rice, N. C., Rauscher, N. A., Langston, J. L., & Myers, T. M. (2018). Behavioral toxicity of sodium cyanide following oral ingestion in rats: Dose-dependent onset, severity, survival, and recovery. *Food and Chemical Toxicology*, 114, 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.02.033>
- Senanayake, G. (2004). *Fundamentals and applications of metal-ligand complexes of gold (I/III) in non-cyanide gold processes*. AUSIMM (pp. 113-122). <https://www.ausimm.com/publications/conference-proceedings/green-processing-2004/fundamentals-and-applications-of-metal-ligand-complexes-of-gold-iiii-in-non-cyanide-gold-processes/>

- Senanayake, G. (2012). Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part I: A review of the effect of hard-soft and Lewis acid-base properties and interactions of ions. *Hydrometallurgy*, 115-116, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.011>
- Sousa, R., Futuro, A., Fiúza, A., Vila, M. C., & Dinis, M. L. (2018). Bromine leaching as an alternative method for gold dissolution. *Minerals Engineering*, 118, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.12.019>
- Sun, Z., Cao, H., Xiao, Y., Sietsma, J., Jin, W., Agterhuis, H., & Yang, Y. (2017). Toward sustainability for recovery of critical metals from electronic waste: The hydrochemistry processes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(7). <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b00841>
- Syed, S. (2012). Recovery of gold from secondary sources—A review. *Hydrometallurgy*, 115-116, 30-51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.12.012>
- Xie, F., Chen, J., Wang, J., & Wang, W. (2021). Review of gold leaching in thiosulfate-based solutions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(11), 3506-3529. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65745-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65745-X)
- Yang, X., Moats, M. S., Miller, J. D., Wang, X., Shi, X., & Xu, H. (2011). Thiourea-thiocyanate leaching system for gold. *Hydrometallurgy*, 106(1-2), 58-63. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.11.018>
- Zammit, C. M., Cook, N., Brugger, J., Ciobanu, C. L., & Reith, F. (2012). The future of biotechnology for gold exploration and processing. *Minerals Engineering*, 32, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.03.016>
- Zhang, Y., Cui, M., Wang, J., Liu, X., & Lyu, X. (2022). A review of gold extraction using alternatives to cyanide: Focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviants. *Minerals Engineering*, 176, 107336. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107336>

CC BY-NC-ND



Disponible en: <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/25286>

Cómo citar el artículo:

Lozada-Rodríguez, L. y Cortes-Llamas, S. A. (2025). Hacia un futuro sin cianuro en la extracción de oro. *CIENCIA ergo-sum*, 32. <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a44>

DOI: <https://doi.org/10.30878/ces.v32n0a44>



Licencia Creative Commons Atribución-No-Comercial-SinDerivar 4.0 Internacional.

Declaración de autoría (CRediT):

Leticia Lozada-Rodríguez: conceptualización, investigación, redacción-borrador original y edición.

Sara A. Cortes-Llamas: conceptualización, supervisión, redacción-revisión y edición.