

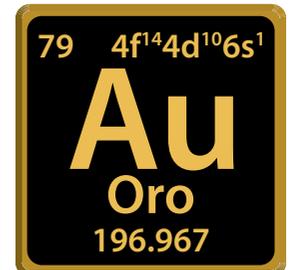
Eduardo González Valdez, Alejandro Alarcón y Ronald Ferrera Cerrato

Las plantas, nuevos mineros para recuperar metales preciosos

La minería es una actividad fundamental para la economía de México, cuyos residuos (comúnmente conocidos como jales mineros) pueden ser sometidos a procesos de recuperación de metales preciosos como oro, plata y cobre. En las últimas décadas se han propuesto alternativas biotecnológicas basadas en el uso de plantas vivas para recuperar oro residual a partir de los jales de mina.

El oro

El oro (Au) es un metal de transición del grupo IB de la tabla periódica, que incluye también elementos como cobre (Cu) y plata (Ag). El Au se caracteriza por ser un elemento muy estable y por exhibir un color amarillo en su estado natural; además, es uno de los metales nobles más importantes para la civilización humana, debido a su amplio uso en joyería, electrónica, industria, odontología, medicina y nanotecnología, así como por su valor e importancia económica. Este metal es uno de los 10 elementos más raros en la corteza terrestre, donde puede alcanzar una concentración promedio de 5 ng/g^{-1} de suelo (Reith y cols., 2007). Sin embargo, el Au no se distribuye de manera uniforme; con frecuencia se encuentra en regiones muy específicas alrededor del mundo (Reith y cols., 2007), por ejemplo, en China, Estados Unidos de América, Rusia, Australia, Perú, sur de África y México, los cuales son los principales productores de este metal (véase la Figura 1). La producción minera mundial en 2017 alcanzó un promedio aproximado de 3000 toneladas o 104 millones de onzas de Au (CAMIMEX, 2017).



El oro en la industria minera de México

La minería es una actividad de gran importancia económica para el desarrollo de México. Los principales estados mineros son: Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Guerrero y Durango, donde se realiza la extracción de metales preciosos como Au,

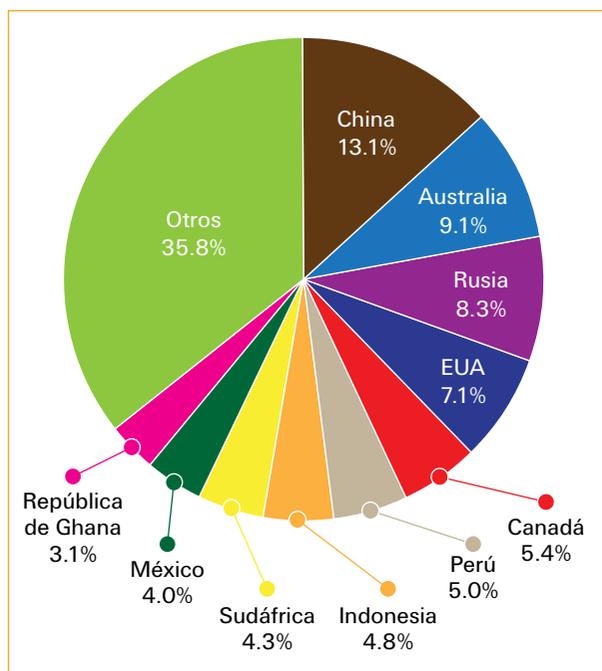


Figura 1. La producción minera mundial de oro en 2017 alcanzó un volumen de 104.4 millones de onzas (CAMIMEX, 2017).

Ag y Cu, entre otros elementos. Sin embargo, la minería convencional suele utilizar grandes cantidades de compuestos químicos como cianuro (CN^-) para la recuperación de Au; los residuos generados por esta actividad se conocen localmente como jales de mina, que suelen ser depositados o acumulados a la intemperie (cielo abierto) (véase la Figura 2). Estos jales mineros son materiales que no tienen valor económico; además, la presencia de CN^- en los residuos puede solubilizar otros elementos potencialmente tóxicos, como mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As) y cadmio (Cd), entre otros, lo que puede generar una gran emisión de partículas que contaminan la superficie del suelo, el aire y el agua.

Las técnicas tradicionales para la recuperación de Au representan un impacto negativo al ambiente y para la salud humana. Es por ello que surgen procesos de recuperación alternativos, como el uso de especies vegetales (denominado fitorremediación), que se fundamenta en los mecanismos fisiológicos, bioquímicos y genéticos que influyen en la extracción (fitoextracción) y acumulación (fitoacumulación) de metales en los órganos vegetales (raíces, tallos y hojas).

La fitorremediación (fitoacumulación y fitoextracción) de metales a partir de jales mineros

Las plantas son organismos vivos que de forma natural tienen la capacidad de absorber metales a partir de la solución del suelo y acumularlos en sus órganos. Esta capacidad se ha aprovechado para remediar o restaurar sitios contaminados con elementos potencialmente tóxicos mediante procesos de fitorremediación, ya sea en el lugar (*in situ*) o fuera de éste (*ex situ*), donde haya problemas de contaminación. En la fitorremediación se incorporan otros términos biológicos, como la inmovilización de los metales en la rizosfera (suelo directamente influenciado por la raíz) de la planta (fitoestabilización), así como la acumulación de los metales en la parte aérea de las plantas (fitoacumulación o fitoextracción).

El término *fitoextracción* se ha utilizado en la literatura científica para describir la recuperación de elementos potencialmente tóxicos con el fin de restaurar un sitio contaminado, o bien para llevar a cabo la recuperación de metales preciosos, tales como el Au, a partir de sustratos auríferos o jales de mina, para su reutilización con fines comerciales. Esto representa un fenómeno relativamente nuevo y que es conocido por la comunidad científica como fitominería, la cual se basa en aprovechar la capacidad de algunas plantas para adaptarse y crecer en los jales de mina. Un ejemplo es la planta *Brassica napus* L, capaz de crecer en jales de mina de Zacatecas (véase la Figura 2) (González-Valdez y cols., 2018). Ésta pertenece a la familia Brassicaceae (véase la Figura 3), tiene floración amarilla y se caracteriza por producir abundante biomasa, tener una altura de hasta 1.5 m según el sustrato donde se desarrolle, además de que sus hojas alcanzan hasta 40 cm de longitud y la raíz primaria puede llegar hasta los 100 cm de profundidad.

La aplicación de ciertos compuestos químicos puede inducir la absorción y la acumulación de Au en los órganos de las plantas cuando éstas se encuentran creciendo en los residuos mineros que están caracterizados por contener bajas concentraciones de este metal (González-Valdez y cols., 2018).



Figura 2. Aspecto general de la deposición de los residuos de mina, en los que se percibe el crecimiento de plantas de pasto o zacate de la pampa (*Cortaderia selloana*) adaptadas a dichas condiciones, en Zacatecas, México.

■ **Acumulación de oro en plantas**

La capacidad de las plantas nativas de diferentes regiones del mundo para acumular Au ha fascinado a la comunidad científica desde inicios del siglo XX (Anderson y cols., 1999b), debido principalmente a que en su estado natural en el suelo [Au(0)] es una especie química insoluble e inmóvil en la solución del suelo (Bali y cols., 2010). Sin embargo, se ha encontrado que la presencia de plantas cianogénicas (productoras de ácido cianhídrico), la aplicación de agentes químicos sintéticos (tiocinato, tiourea, tiosulfato o cianuro), o bien la función de los microorganismos (bacterias, hongos y levaduras) que habitan en la rizosfera de las plantas, pueden inducir diferentes estados de oxidación del Au al producir ácido cianhídrico y, así, formar complejos con ciertos iones, por ejemplo, Au-CN. Lo anterior favorece la solubilidad y la biodisponibilidad de este metal para ser absorbido por la raíz de la especie vegetal y ser translocado (movilizado) hacia

la parte aérea de la planta, para su posterior extracción cuando se cosecha después de cierto tiempo de crecimiento.

Aun cuando se tienen algunas investigaciones referentes a los procesos de fitoextracción de Au, la información acerca de los mecanismos de absorción, transporte y localización del Au en las plantas es limitada (Bali y cols., 2010). Sin embargo, se ha sugerido al proceso de evapotranspiración como un posible mecanismo acarreador del Au de la raíz hacia la parte aérea de la planta, donde el agua es transpirada pero el Au se acumula en los tejidos (Anderson, 2005; González-Valdez y cols., 2018).

La literatura científica indica que las especies vegetales utilizadas para absorber Au son tolerantes a las condiciones físicas y químicas de los jales de mina. Estas plantas pueden ser hiperacumuladoras, es decir, acumulan cantidades extraordinarias de ciertos iones metálicos en la parte aérea, lo que implica que hay mecanismos internos que evitan que



Figura 3. Plantas de *Brassica napus* L. creciendo en un jal de mina en Zacatecas, México, después de 57 días de cultivo en invernadero.

los iones metálicos causen toxicidad, o bien pueden producir abundante biomasa, por ejemplo, *Zea mays* L. (maíz), *Brassica juncea* L. (mostaza india), *B. napus* L. (colza) y *Helianthus annuus* L. (girasol). Estas especies vegetales se han combinado con agentes químicos sintéticos (cianuro, tiocianato, tiosulfato o tiourea) para inducir la solubilización de Au y, con ello, facilitar su absorción y acumulación en la planta, fenómeno que se conoce como hiperacumulación inducida.

La hiperacumulación inducida se logra cuando la planta concentra ya sea Au o Ag en más de 1 mg/kg^{-1} de tejido seco (González-Valdez y cols., 2018). La máxima fitorreclamación de Au obtenida con *B. juncea* y cianuro de sodio a partir de un jal de mina en condiciones de campo logró 39 mg/kg^{-1} de materia seca vegetal (Sheoran y cols., 2013); sin embargo, para que esta actividad pueda ser económicamente viable, en una cosecha de 10 t/ha de biomasa seca se debería producir una concentración de 100 mg de Au por kilogramo de peso seco, esto equivale a un 1 kg de Au por hectárea (Maluckov, 2015). No obstante, la mayoría de los estudios publicados han propuesto utilizar solamente la planta, o bien el agente químico sintético, para solubilizar el Au. Sin embargo, la eficiencia de los procesos de solubilización y de recuperación de los metales preciosos en los órganos vegetales puede mejorarse al combinar agentes químicos sintéticos y microorganismos rizosféricos que inducen la biolixiviación

de los metales para dejarlos biodisponibles para las plantas (Maluckov, 2015).

En este sentido, González-Valdez y cols. (2018) utilizaron tiocianato o tiosulfato y la inoculación con dos cepas de *Aspergillus niger* en plantas de *B. napus* crecidas en un jal de mina; sus resultados indican que el efecto combinado de *B. napus* + *A. niger* + tiocianato o tiosulfato incrementó el criterio de hiperacumulación de Au y de Ag (1 mg/kg^{-1}), así como de Cu ($>1000 \text{ mg/kg}^{-1}$) en tejido vegetal seco. Lo anterior refleja un efecto positivo y novedoso para futuros estudios enfocados a la fitoextracción inducida de metales preciosos a partir de residuos mineros. Así, las plantas se consideran como mineros alternativos para recuperar metales preciosos.

■ Procesos de recuperación biológica de oro a partir del uso de plantas

■ Algunas especies vegetales tienen la capacidad de crecer, absorber y acumular metales pesados a partir de residuos de mina sin mostrar signos visibles de toxicidad. Esta capacidad de acumulación ha permitido proponer a la fitominería de Au como un proceso convencional para la recuperación del metal (véase la Figura 4). Lo primero es seleccionar una especie vegetal tolerante a las características físicas y químicas del residuo minero, que produzca abundante biomasa y que sea capaz de hiperacumular el metal de interés; estas características pueden definirse me-



Figura 4. Representación de un proceso biológico para la recuperación de Au a partir de plantas. Adaptado y modificado de Anderson y cols. (1999a).



diante pruebas de germinación y crecimiento en el residuo aurífero de estudio. Una vez seleccionada la especie vegetal, ésta puede ser sembrada y cultivada en el sustrato que contenga el Au, y durante su crecimiento se adicionarán algunos nutrimentos para maximizar su desarrollo. Una vez alcanzada la madurez de la planta, se puede aplicar un agente químico sintético para favorecer una mayor solubilización del metal e inducir con ello la hiperacumulación de Au o de otros metales preciosos. Después de cierto tiempo (1 a 2 semanas) el cultivo puede ser cosechado, para posteriormente secarlo a temperatura ambiente con el fin de eliminar la humedad, e incinerarlo y reducirlo a cenizas en una mufla; finalmente, será fundido para recuperar el metal de interés (Robinson y cols., 1999; Sheoran y cols., 2013). Esta metodología biológica permite recuperar cantidades traza de Au como alternativa al uso de técnicas convencionales dirigidas a ello, y cuya aplicación no es económicamente viable. Además, el uso de plantas para la extracción y acumulación de metales contribuye a la disminución del impacto ambiental generado por el uso excesivo de compuestos químicos (González-Valdez y cols., 2018).

■ ■ ■ Conclusiones y perspectivas

■ El uso de plantas para restaurar sitios contaminados por metales pesados, o bien para recuperar metales preciosos a partir de residuos mineros es una opción ecológicamente viable para su implementación en México. Así, la fitominería es una alternativa que permite recuperar cantidades residuales de Au contenido en los jales de mina, donde la aplicación de técnicas químicas convencionales comúnmente utilizadas en la minería no es rentable.

Eduardo González Valdez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
lalogvaldez@yahoo.com.mx

Alejandro Alarcón

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (Texcoco, Estado de México).
aalarconcp@gmail.com • alexala@colpos.mx

Ronald Ferrera Cerrato

Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (Texcoco, Estado de México).
rferrercerrato@gmail.com • ronalfc@colpos.mx

Lecturas recomendadas

- Anderson, C. W. N., R. R. Brooks, A. Chiarucci, C. J. LaCoste, M. Leblanc, B. H. Robinson, R. Simcock y R. B. Stewart (1999a), "Phytomining for nickel, thallium and gold", *Journal of Geochemical Exploration*, 67:407-415.
- Anderson, C. W. N., R. R. Brooks, R. B. Stewart y R. Simcock (1999b), "Gold uptake by plants", *Gold Bulletin*, 32(2):48-51.
- Anderson, C. W. N. (2005), "Biogeochemistry of gold: accepted theories and new opportunities", En I. Shtangeeva (ed.), *Trace and Ultratrace Elements In Plants And Soil*, Southampton, WIT Press, pp. 287-321.
- Bali, R., R. Siegele y A. T. Harris (2010), "Phytoextraction of Au: Uptake, accumulation and cellular distribution in *Medicago sativa* and *Brassica juncea*", *Chemical Engineering Journal*, 156(2):286-297.
- CAMIMEX (2017), "Situación de la minería en México 2017", *Cámara Minera de México*. Disponible en: <<https://www.camimex.org.mx/>>, consultado el 17 de julio de 2018.
- González-Valdez, E., A. Alarcón, R. Ferrera-Cerrato, H. R. Vega-Carrillo, M. Maldonado-Vega, M. A. Salas-Luévano y R. Argumedo-Delira (2018), "Induced accumulation of Au, Ag and Cu in *Brassica napus* grown in a mine tailings with the inoculation of *Aspergillus niger* and the application of two chemical compounds", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 154:180-186.
- Maluckov, B. S. (2015), "Bioassisted phytomining of gold", *JOM*, 67(5):1075-1078.
- Reith, F., M. F. Lengke, D. Falconer, D. Craw y G. Southam (2007), "The geomicrobiology of gold", *Multi-disciplinary Journal of Microbial Ecology*, 1(7):567-584.
- Robinson, B. H., R. R. Brooks y B. E. Clothier (1999), "Soil amendments affecting nickel and cobalt uptake by *Berkheya coddii*: Potential use for phytomining and phytoremediation", *Annals of Botany*, 84(6):689-694.
- Sheoran, V., A. S. Sheoran y P. Poonia (2013), "Phytomining of gold: A review", *Journal of Geochemical Exploration*, 128:42-50.