

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 772 823**

51 Int. Cl.:

**C22B 1/14** (2006.01)

**C22B 3/06** (2006.01)

**C22B 3/18** (2006.01)

**C22B 15/00** (2006.01)

**C08L 23/12** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **11.01.2016** **E 16150733 (0)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.11.2019** **EP 3042969**

54 Título: **Procedimiento de lixiviación de concentrados minerales**

30 Prioridad:

**09.01.2015 CL 2015000059**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**08.07.2020**

73 Titular/es:

**SOCIEDAD PUNTA DEL COBRE S.A (100.0%)**  
**El Bosque Sur 130. piso 14 Las Condes**  
**Santiago, CL**

72 Inventor/es:

**RIVADENEIRA HURTADO, JUAN**

74 Agente/Representante:

**GONZÁLEZ PECES, Gustavo Adolfo**

ES 2 772 823 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Procedimiento de lixiviación de concentrados minerales

**Campo de la invención**

5 La presente invención se relaciona con un procedimiento de lixiviación de material que contiene metal o concentrados de minerales metálicos que implican un material de soporte para aglomerar concentrados minerales que permite la recuperación posterior de sus metales de valor económico mediante lixiviación. Más específicamente, se refiere al uso de un soporte que comprende partículas de polipropileno de entre 3 y 20 mm, no porosas, con un peso específico menor a 1, estables en ambientes altamente corrosivos como soluciones ácidas fuertes, resistentes a las abrasiones, no deformable a temperaturas de hasta 100 °C, con la capacidad de que los concentrados  
10 minerales se adhieran establemente como una capa fina en la superficie del soporte formando un aglomerado, a través de un procedimiento físico que permite que dicho concentrado se aglomere, como mediante el uso de un tambor rotatorio.

**Antecedentes de la invención**

15 Las reservas de minerales oxidados de cobre de alto grado continuarán disminuyendo en Chile y otras partes del mundo, lo que a su vez provocará el cierre o disminuirá la capacidad operativa de la mayoría de las plantas operativas de lixiviación ácida en la próxima década. Como resultado, se buscarán otras alternativas, como la extracción por disolvente (SX) y las instalaciones de electrodeposición (EW) necesarias para concentrar y electrodepositar el cobre contenido en las soluciones de lixiviación preñadas (PLS) y el electrolito cargado, respectivamente. Además, debido a la disminución en la explotación de los recursos minerales de cobre oxidados,  
20 se puede prever un aumento significativo en la explotación de minerales sulfurados de cobre en Chile. Estos minerales se tratan normalmente mediante molienda y flotación para generar altas concentraciones de minerales sulfurados de cobre, que luego se deben tratar mediante fundición. Actualmente, aproximadamente el 80 % del cobre producido en Chile es a través de pirometalurgia usada en plantas de fundición. Las concentraciones de calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) se refinan exclusivamente por este procedimiento. Sin embargo, este procedimiento posee problemas inherentes, tales como: alta inversión de capital que limita la explotación económicamente viable del  
25 cobre a solo grandes reservas de cobre; costos operativos elevados; y grandes volúmenes de emisiones de gas  $\text{SO}_2$  que requieren procedimientos complejos y costosos para que la emisión se purifique y finalmente el  $\text{SO}_2$  se recupere en forma de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), y si este ácido sulfúrico no puede venderse, debe neutralizarse antes de que puede desecharse de forma segura para el medio ambiente. Las plantas de fundición, a su vez, presentan  
30 problemas con la emisión de polvo metálico, gases fugitivos y soluciones ácidas residuales con alto contenido de Pb, As, Sb, Cu, Zn, Hg, Bi y Se que impiden el tratamiento de minerales de cobre con alto contenido concentraciones de estos contaminantes. Como resultado, enormes reservas de minerales sulfurados de cobre, como los minerales de enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ), por ejemplo, no son adecuados para la explotación y el tratamiento.

35 La mayor proporción del cobre mineralizado como sulfuros de cobre primarios y secundarios se encuentra en la forma de calcopirita. La Tabla 1 muestra en orden creciente los minerales sulfurados que son más resistentes a ser lixiviados. Como se puede ver, la calcopirita está en el penúltimo lugar y, como consecuencia práctica, es el mineral de cobre más recalcitrante que se lixivía, lo que requiere que se disuelvan las altas temperaturas y la presión.

Tabla 1: Minerales de acuerdo con su resistencia creciente a la oxidación

Pirrotita	$\text{FeS}$
Calcosina	$\text{Cu}_2\text{S}$
Covelita	$\text{CuS}$
Tetrahidrita	$3\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{Sb}_2\text{S}_3$
Bornita	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4$
Galena	$\text{PbS}$
Arsenopirita	$\text{FeAsS}$
Esfarelita	$\text{ZnS}$
Pirita	$\text{FeS}_2$
Enargita	$\text{Cu}_3\text{AsS}_4$
Marcasita	$\text{FeS}_2$
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$

(continuación)

Molibdenita	MoS <sub>2</sub>
-------------	------------------

Dadas las dificultades y restricciones de la ruta pirometalúrgica, se han desarrollado rutas hidrometalúrgicas alternativas para el procesamiento de concentrados minerales.

5 Entre las diversas tecnologías de hidrometalurgia, la biolixiviación es una alternativa atractiva. La biolixiviación es una metodología de solubilización de extracción de metales a partir de la oxidación de una matriz mineral compleja, usando la acción directa o indirecta de microorganismos. Varios microorganismos de cable de tales hazañas se conocen en la técnica como agentes de lixiviación biológica. Estos microorganismos, en general, son capaces de oxidar algunos compuestos como el hierro ferroso y el azufre. La oxidación bacteriana de minerales es un término aplicado a la solubilización microbiológica de los contenidos de un mineral para solubilizar el metal valioso (es decir, el procedimiento de biolixiviación) para la recuperación posterior del lixiviado, o para la eliminación de al menos algunos de los minerales/elementos. que acompañan al metal de interés (es decir, procedimiento de biooxidación).

10 La mayoría de los agentes de lixiviación biológica usados comercialmente, adecuados para su uso en un procedimiento de biolixiviación son bacterias mesofílicas acidófilas que se encuentran mayoritariamente en entornos de alta acidez y temperaturas moderadas (20-30 °C). Sin embargo, en las últimas décadas se han desarrollado una serie de estudios y procedimientos con microorganismos termofílicos extremos aislados de aguas termales y procedimientos metalúrgicos, que viven en ambientes de alta salinidad y temperaturas superiores a 60 °C. Estos microorganismos han demostrado ser más eficientes en la disolución de minerales recalcitrantes que las bacterias mesofílicas.

15 Existen varios factores que afectan la lixiviación y recuperación de los metales de interés. Los más importantes son: el tipo de reactor usado, que en el caso de la presente invención incluye, pero no se limita a, lixiviación en pilas, vertederos, tanques agitados o presión; la granulometría y dispersión del material fino; la presencia de arcilla e impurezas calcáreas complejas; la temperatura de funcionamiento del reactor; el pH y la concentración de ácido libre en las soluciones de lixiviación; el tipo de mineral a lixiviar; y la concentración de iones de inhibidores potenciales; entre otros.

20 Una de las ventajas de implementar sistemas de biolixiviación y recuperación de metales de interés es que los procedimientos de extracción microbiana de metales presentan menos riesgos para el medio ambiente que otros procedimientos metalúrgicos. La razón es que los procedimientos de biolixiviación no requieren cantidades tan intensas de energía y no producen dióxido de azufre ni otros gases dañinos. Esto permite el procesamiento de concentrados minerales con grandes cantidades de impurezas.

25 Se sabe que la lixiviación de minerales de calcopirita, y en general sulfuros de cobre y sulfuros de hierro primarios, no es susceptible de ataque ácido en la lixiviación en pilas a temperatura ambiente. Esto se debe a la rápida pasivación del mineral lixiviado por una capa de precipitados que se forma en la superficie del mineral. Estos depósitos superficiales reducen significativamente la recuperación de cobre por biolixiviación. La formación de esta capa pasiva varía mucho, dependiendo de condiciones, tales como variaciones de temperatura, pH y concentración de oxígeno del lecho o la pila. Para reducir la formación de esta capa pasiva, se han desarrollado diferentes tecnologías de lixiviación para la calcopirita, algunas de las cuales son de naturaleza fisicoquímica, como la lixiviación a presión para concentrados de cobre. Mediante la aplicación de oxígeno a alta presión en un autoclave y un ajuste controlado de la temperatura, se puede lograr una reacción de oxidación mucho más rápida en cuestión de minutos a horas, y la formación de azufre está presente al final del procedimiento, ya sea en forma de S elemental o sulfato SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Las desventajas de estos reactores de presión es su alta inversión de capital y costos operativos, por lo que solo se han usado con éxito a escala comercial en el procesamiento oxidativo de minerales que contienen algunos de los metales de mayor valor; oro, plata o molibdenita. Esto se debe al hecho de que se usa oxígeno puro a presión como reactivo, cuya generación exige un enorme consumo de energía eléctrica, elevando así enormemente los costos operativos. Otra tecnología, de naturaleza más química, es la desarrollada por Compañía Minera Michilla S.A., controlada por Antofagasta PLC, llamada CUPROCLOR®. Esta tecnología se aplica para la lixiviación de sulfuros de cobre en montones usando un exceso de iones de cloruro en una solución de lixiviación (como los iones de cloruro totales de 90 g/l, de los cuales 30 g son típicamente aportados por el uso de agua de mar y el resto, 60 g en forma de cloruro de calcio). La tecnología permite la presencia de dos pares redox Cu(II)/Cu(I) y Fe(III)/Fe(II) en solución y simultáneamente evita la formación de la capa pasiva de precipitados descritos anteriormente, lo que resulta en altos porcentajes de cobre. recuperación (a veces tan alto como el 95 %). Sin embargo, este modelo no es fácilmente reproducible cuando se intenta transformar otras plantas de lixiviación por oxidación en plantas de procesamiento de sulfuro.

30 Aunque la tecnología de biolixiviación de sulfuros de cobre primarios a altas temperaturas ofrece una solución económica y ecológica a los problemas de recuperación generados por la formación de una capa pasiva en la superficie de una partícula durante la lixiviación, esta tecnología no se ha aplicado comercialmente para la

biolixiviación de concentrados de calcopirita ni de enargita; si bien los experimentos de laboratorio y las pruebas del reactor de tanque agitado usando microorganismos termófilos, como en el procedimiento BIOCOP® de Codelco Chile y BHP Billiton, han demostrado viabilidad técnica, sigue habiendo una inadecuación comercial debido a los altos costos de inversión requeridos y las complejidades operativas demostradas en las pruebas del procedimiento.

- 5 En general, la lixiviación en pilas de una capa de concentrado aglomerado en una partícula de soporte podría describirse como un procedimiento guiado por un modelo de lixiviación de capa delgada. Mientras se establezca una buena difusión de oxígeno en el lecho y se mantenga una temperatura alta en el interior de la lixiviación en pilas, se puede evitar la formación de precipitados de jarosita en la superficie de la partícula a lixiviar, y se puede evitar la lixiviación de minerales sulfurados de cobre. Este sistema, en marcado contraste con los procedimientos de tanque agitado, permite que los microorganismos capaces de biolixiviación se adhieran a la superficie del mineral, formando una biopelícula basada en una matriz de microorganismos y polisacáridos secretados por los microorganismos. Dicha matriz permite una biolixiviación más efectiva de la partícula mineral.

15 Con el fin de alcanzar y mantener las temperaturas requeridas para lograr la biolixiviación de los minerales sulfurados de cobre, se prefiere que diferentes poblaciones de bacterias oxidantes de hierro y oxidantes de azufre con diferentes temperaturas óptimas de crecimiento estén presentes con el tiempo, e intentan optimizar las tasas de crecimiento de los diferentes consorcios. En relación con el uso de microorganismos en los procedimientos de lixiviación, ha habido un cambio de perspectiva en la última década debido al aumento de la complejidad como una diversidad cada vez mayor de microorganismos presentes en dichos entornos. Hoy en día, se está explorando el uso de varios consorcios microbiológicos en lugar de unos pocos microorganismos "clave" descritos primariamente, tales como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans* o *Leptospirillum*, a los cuales se añade otros microorganismos, tales como *Acidianus brierleyi*, *A. thermosulfoxidans*, *Sulfobacillus thermosulfoxidans*. Esta progresión se ha producido, en parte, por la aplicación de contribuciones significativas generadas por la investigación del campo de la ecología microbiana que ha observado una amplia diversidad de microorganismos presentes en el entorno de los procedimientos mineros.

25 Actualmente, los microorganismos termófilos (bacterias o arqueas), tanto los moderados (con capacidad para crecer a temperaturas entre 50 y 60 °C) como los termófilos extremos (con capacidad para crecer a temperaturas superiores a 60 °C) han demostrado ser capaces de la recuperación de cobre a partir de minerales de calcocita, se ha usado a nivel de modelos físicos y en una escala de prototipo y rastro de operaciones de biolixiviación de sulfuro de cobre. Las reacciones químicas exotérmicas llevadas a cabo por las actividades metabólicas de los microorganismos presentes en los ambientes biohidrometalúrgicos de la biooxidación de sulfuro, generan las condiciones fisicoquímicas necesarias para elevar las temperaturas dentro de los reactores de lixiviación, observados en tipos de reactores como tanque agitado, pila o vertedero presente en operaciones mineras actuales.

#### *Biolixiviación de calcopirita.*

35 La calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) es el sulfuro de cobre más recalcitrante a la oxidación. Bajo la influencia de *A. ferrooxidans*, la velocidad de oxidación de este sulfuro se incrementa significativamente en comparación a los procedimientos netamente químicos. Los sulfuros secundarios de cobre, calcocita ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), covelita ( $\text{CuS}$ ), bornita ( $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ ) se oxidan más fácilmente por acción directa e indirecta de bacterias. A un nivel industrial, la tecnología de biolixiviación se ha aplicado en pilas (Chile, EE. UU., Perú, etc.). Southern Perú ha aplicado la tecnología para la recuperación de cobre en sus vertederos de sulfuros de grado bajo de Toquepala. En Chile, Billiton y Codelco, en años pasados, llevaron a cabo investigaciones para recuperar el cobre contenido en minerales de arsénico, un procedimiento llamado BIOCOP. Aunque el procedimiento arrojó resultados positivos desde el punto de vista cinético, no se desarrolló más ni se estableció como un procedimiento comercial.

#### *Biolixiviación de otros metales sulfurados.*

45 Recuperación de oro: La lixiviación bacteriana se usa también para romper la matriz del sulfuro (principalmente, pirita y/o arsenopirita) que se encuentra "atrapada" en la partícula aurífera, permitiendo la posterior recuperación del oro a través de cianuración convencional. En otras palabras, el procedimiento es un pretratamiento antes que una disolución directa del metal. Bactech, de Australia, ha desarrollado un procedimiento que emplea bacterias moderadamente termófilas para el tratamiento de sulfuros y de metales base que se conoce como el procedimiento BACTECH). Las evaluaciones preliminares han reportado una recuperación de hasta el 98 % del oro contenido en el mineral.

Recuperación de zinc: La acción bacteriana en sulfuro de zinc también ha sido evaluada. Aunque no se conocen plantas comerciales, su aplicación tiene un enorme potencial. La esfalerita es el sulfuro de zinc más oxidable, influenciado en gran medida por la presencia de hierro.

55 Recuperación de plomo: La lixiviación bacteriana de galena origina la formación de  $\text{PbSO}_4$  que es insoluble en medio ácido, una propiedad que puede emplearse en la separación de algunos valores metálicos acompañantes en una mena de plomo.

Recuperación de níquel: El níquel se lixivia a partir de sulfuros (pentandlita y milerita) y de menas de hierro en presencia de *A. ferrooxidans*, el cual es de 2 a 17 veces más rápido que el procedimiento netamente químico.

Recuperación de antimonio: Hay algunos trabajos que reportan la habilidad de *At. ferrooxidans* de oxidar antimonita ( $Sb_2S_3$ ) a pH 1,75 y a 35 °C. También se reporta la capacidad de *At. thiooxidans* de oxidar este sulfuro.

5 Recuperación de metales minerales de tierras raras: Los metales de tierras raras están presentes en la porción cristalina de muchos sulfuros y minerales de silicato. Para liberar los metales, es necesario oxidar los sulfuros o destruir la matriz de los silicatos. La literatura informa la posibilidad de oxidar una variedad de estos metales mediante el uso de bacterias del género *Acidithiobacillus*, tales como: galio y cadmio presentes en la esfalerita (el principal transportador de estos elementos); de germanio y cobalto, de renio, selenio y telurio, titanio y uranio, entre otros.

#### *Patentes previas relevantes*

10 La patente CN102230084 B describe un procedimiento de tratamiento de mineral, que incluye etapas de molienda del mineral, aglomeración del mineral con un adhesivo, disposición en pilas y riego con ácido sulfúrico y un cultivo bacteriano. Es importante subrayar que la invención descrita en esta patente no comprende la aglomeración del mineral molido sobre un soporte ni la mantención de altas temperaturas durante el procedimiento de lixiviación.

15 La patente norteamericana US 6.063.158 (MBX SYSTEMS, INC) describe un procedimiento de aglomeración de concentrado mineral sobre una matriz de polietileno de forma esférica con un anillo y un alfiler. El procedimiento también comprende el uso de *T. thiooxidans*, para la biolixiviación del concentrado aglomerado, en sistemas de columnas, a temperatura ambiente.

20 La patente norteamericana US 6.083.730 (Geobiotics Inc.) reivindica un método que consiste en la aglomeración de un concentrado mineral de sulfuro en la superficie de partículas minerales (roca volcánica, grava o roca) con un tamaño que varía de 0,6 a 2,5 cm. Este material está organizado en montones para su posterior biolixiviación.

La patente US 8.491.701 reivindica un procedimiento de biolixiviación adecuado para aglomerados minerales que implican la inoculación de estas aglomeraciones con bacterias y nutrientes necesarios para el crecimiento bacteriano. La patente describe que al menos parte de la lixiviación en pilas consiste en material aglomerado. Sin embargo, no revela ningún procedimiento de aglomeración particular que sea adecuado para tal biolixiviación.

25 La patente US 8.119.085 describe un procedimiento de lixiviación de minerales que consiste en moler el mineral, aglomerándolo en un aglomerador mediante la adición de agua, un aglutinante y un ácido. Posteriormente se forman pilas, las que son regadas con una solución que contiene bacterias oxidantes de sulfuros.

30 La patente US 6.096.113 describe un procedimiento de biolixiviación en tanque cerrado que consiste en tratar parte del mineral con microorganismos biooxidantes. Después, este material pretratado se aglomera sobre material mineral no tratado. La aglomeración requiere el uso de materiales secantes y floculantes en un aparato aglomerador. Este procedimiento se refiere a minerales refractarios que contienen metales preciosos, los que son recuperados, a partir del producto oxidado en la pila, mediante un procedimiento de calentamiento y adición posterior de un agente lixivante (tal como cianuro).

35 La patente US 5.766.930 describe un procedimiento que principalmente describe un procedimiento para biorremediar pilas de suelos contaminados con sustancias orgánicas, sin agitación. El procedimiento comprende mezclar el sustrato a remediar con capas de material grueso seleccionado entre piedras, trozos de ladrillo, trozos de cemento y plástico.

40 La tecnología GEOCOAT® consiste en depositar una capa de concentrado de sulfuro sobre una roca de soporte de tamaño específico, amontonar dicho material en pilas, irrigar con soluciones de nutriente ácido y suministrar aire a baja presión a la base de la pila. Luego de la biooxidación, el concentrado es removido de la roca de soporte mediante tamizado húmedo. El residuo de concentrado es luego neutralizado y sujeto a procedimientos tradicionales de recuperación de oro. El soporte puede ser reciclado.

45 Algunas de las desventajas de esta tecnología es que el sustrato de aglomeración no es completamente inerte a la acción microbiana y del ácido, y por su naturaleza mineral, el gasto de energía involucrado, tanto para la aglomeración como para la recuperación del soporte rocoso, es muy superior comparado con la tecnología de la presente invención.

#### **Descripción de la presente invención**

La presente invención se refiere a un procedimiento de lixiviación de material que contiene metal o concentrados minerales metálicos que comprende las etapas:

- 50 a. Adherir concentrados minerales o un material que contiene metal de manera estable a un soporte para formar aglomerados; en los que dicho soporte se caracteriza porque está hecho de partículas de polipropileno no porosas de entre 3 y 20 mm, de gravedad específica menor que 1, estable en soluciones fuertemente ácidas de pH1 - pH4, resistente a la abrasión y no se deforma a temperaturas de hasta 60 °C;
- b. Transporte de los aglomerados a un sitio de procesamiento;

- c. Cargando los aglomerados en un reactor de lecho empacado o formando una pila de aglomerados;
- d. Lixiviación del concentrado mineral o material que contiene metal mediante el riego con agentes químicos y/o biológicos presentes en una solución ácida;
- e. Opcionalmente, suministrar aire forzado al reactor o a la pila de aglomerados en una dirección contracorriente en relación con la de la solución de riego;
- f. Recuperar la solución cargada o "PLS" que se filtró en el reactor o en la pila para su tratamiento posterior;
- g. Recuperación de los residuos sólidos del reactor o la pila;
- h. Separación de los sólidos residuales, concentrados minerales sin blanquear y cualquier precipitado formado;
- i. Reutilizando el soporte en otro ciclo del procedimiento de lixiviación que comprende las etapas d - h.

El procedimiento implica el uso de un producto que proporciona un material de soporte que es homogéneo o de distribución estrecha de tamaño y forma, tiene una densidad más baja que el agua y es adecuado como soporte para concentrados minerales, minerales metálicos o materiales que contienen metal. Lixiviado en procedimientos químicos o de biolixiviación. El propósito del soporte es permitir la adhesión de los concentrados minerales en una forma estable para que puedan tratarse mediante lixiviación en lechos empacados o reactores de pilas. Mediante la acción de microorganismos o de productos químicos, se pueden obtener soluciones cargadas con metales de interés, contenidos en la matriz concentrada.

El soporte es altamente susceptible de reciclaje para uso repetido en tales sistemas. Un aspecto de esto es que el soporte está compuesto de un material que puede mantener su tamaño y forma originales cuando se somete al peso acumulado de al menos 2 m, preferentemente al menos 3 m, más preferentemente al menos 4 m, más preferentemente al menos 5 m, preferentemente al menos 6 m, lo más preferentemente al menos 10 m, del mismo material de soporte que descansa sobre él. Tal rigidez bajo presión permite que el soporte se apile en un reactor o la pila de tamaño comercialmente relevante para operaciones de lixiviación industrial. El soporte debe ser física y químicamente estable cuando se incuba durante al menos 150 días, preferentemente al menos 300 días, preferentemente 450 días, lo más preferentemente al menos 600 días en un ambiente altamente corrosivo. Por "ambiente altamente corrosivo" se entiende un pH bajo y temperaturas entre 40 °C y 100 °C, opcionalmente también con alta salinidad. Un intervalo de pH bajo relevante para esta área de aplicación es del orden de pH 5 a pH 0,2, preferentemente pH 4,5 a pH 0,2, más preferentemente pH 4 a pH 0,2, más preferentemente pH 3,5 a pH 0,2, más preferentemente pH 3,0 a pH 0,2, más preferentemente pH 2,5 a pH 0,2, más preferentemente pH 2,0 a pH 0,2, más preferentemente pH 1,5 a pH 0,2, más preferentemente pH 1 a pH 0,2. El intervalo de temperatura preferido para algunos aspectos de la invención, dentro del cual el soporte debe permanecer físicamente estable (tamaño y forma) depende de los agentes de lixiviación usados, especialmente en el caso de los agentes de biolixiviación, de los cuales algunas especies solo pueden tolerar temperaturas de hasta 40 °C, preferentemente hasta 50 °C, más preferentemente hasta 60 °C, más preferentemente hasta 70 °C, más preferentemente hasta 80 °C, más preferentemente hasta 90 °C, lo más preferentemente hasta 100 °C. Además, el soporte no solo debe ser física y químicamente estable en las condiciones anteriores encontradas durante el procedimiento de lixiviación, sino que el material de soporte no debe ser degradado o afectado por los agentes químicos o de biolixiviación usados en el procedimiento. Los materiales adecuados a partir de los cuales puede hacerse el soporte incluyen polímeros inertes o compuestos poliméricos. El soporte puede comprender homopolímeros o copolímeros o mezclas de los mismos siempre que sean termoestables hasta al menos 100 °C. En una realización preferida, el material de soporte es un polímero derivado de la industria petroquímica. El material de soporte puede comprender sustancialmente o consistir en cualquiera de los siguientes: fluoropolímeros, polisiloxanos, cerámica, plástico termoendurecible curado con una temperatura de degradación superior a 100 °C o mezclas de los mismos. En la presente invención, las partículas están compuestas de polipropileno.

Más específicamente, se describe el uso de un soporte compuesto por partículas de polipropileno que cumplen con los siguientes criterios: tienen entre 3 y 20 mm, tienen un peso específico de menos de 1, son estables en ambientes altamente corrosivos, como soluciones ácidas fuertes. resistentes a la abrasión, no son deformables a temperaturas de hasta 100 °C y tienen la capacidad de retener o unir concentrados minerales en su superficie para formar aglomerados estables. Estos aglomerados están compuestos de partículas de polipropileno cubiertas por una fina capa de concentrado mineral, y generalmente se obtienen a través de un procedimiento físico que fomenta la aglomeración, como el uso de un tambor rotatorio o tecnologías similares.

Dichos soportes pueden empaquetarse homogéneamente en un reactor o colocarse en una pila. Esta configuración de reactor o pila muestra recuperaciones mejoradas de concentrados minerales con altos contenidos de impurezas en comparación con los procedimientos de lixiviación descritos en la técnica anterior.

Una ventaja de la presente invención es producir cantidades reducidas de corrientes de desechos, efluentes (incluidos escombros y/o residuos) y, en general, emisiones potencialmente contaminantes y perjudiciales para el medio ambiente. Además, la presente invención reduce la demanda de energía para obtener metales de valor económico.

Otra ventaja de algunos aspectos de la presente invención es que el procedimiento de biolixiviación en sí es más sostenible que un procedimiento de lixiviación puramente químico.

Otra ventaja más de la invención es que proporciona una alternativa más sostenible para el tratamiento de

concentrados minerales que antes se realizaban mediante procedimientos exigentes de energía, como la fundición. Estos procedimientos tienen un costo de tratamiento más alto y pueden ser económicamente inviables de ejecutar. Por lo tanto, la tecnología de la presente invención también puede aumentar el valor económico de minerales como la enargita (sulfuro de arsénico de cobre,  $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) y menas de minerales relativamente impuros.

- 5 El soporte usado en la aplicación de la presente invención incluye partículas de polipropileno de entre 3 y 20 mm, y resistentes a temperaturas de hasta 100 °C y alta acidez (tal como pH 3, preferentemente pH 2,5, más preferentemente pH 2, incluso más preferentemente pH 1,5, lo más preferentemente pH 1).

10 Las formas preferidas del soporte de polipropileno pueden ser lenticulares, esféricas, ovales, cóncavas, convexas, cuadradas, cilíndricas (microgránulos), rectangulares y/o irregulares. Cualquiera que sea la forma que adopte el soporte, es muy preferible que comprenda bordes redondeados. Siempre que pueda flotar sobre el agua, el soporte puede ser hueco o sólido o tener una capa de cubierta dura de mayor densidad y un núcleo interno de menor densidad. El soporte puede tener una superficie exterior lisa o una superficie rugosa. Una superficie lisa tiene la ventaja de una limpieza más fácil durante la fase de reciclaje, una superficie rugosa tiene la ventaja de aumentar el área de superficie para cargar concentrados minerales y el crecimiento de biopelículas. Se prefiere una superficie estriada o picada en las partículas de soporte en algunos aspectos de la presente invención. El soporte puede comprender una mezcla de cualquiera o todas las características anteriores, pero se prefiere una mezcla homogénea de partículas de soporte para su uso en pilas o reactores.

15 Algunos aspectos de la presente invención se refieren a procedimientos de lixiviación química y/o biolixiviación que usan un sustrato de aglomeración que es inerte a una temperatura de hasta 100 °C, acidez hasta un pH de 0,2 y actividad microbiana, y tiene una densidad menor que el agua. Esta última característica permite que el sustrato se recupere más fácilmente para su reutilización. Preferentemente, el soporte de aglomeración es de tamaño uniforme. Preferentemente, el soporte de aglomeración tiene bordes redondeados. Lo más preferentemente, el soporte de aglomeración toma la forma de una población homogénea de partículas. Se espera que el soporte se una a la mayor cantidad de concentrado aglomerado en su superficie sin bloquear la circulación del líquido/aire en los canales porosos del lecho empaquetado.

20 Una vez que el procedimiento de oxidación o lixiviación del concentrado aglomerado ha ocurrido alrededor de las partículas de soporte, las partículas pueden reusarse para un nuevo ciclo de aglomeración/lixiviación en el reactor. Las partículas pueden lavarse opcionalmente con ácido o agua diluidos y eliminarse fácilmente de la solución de lavado ya que su gravedad específica es inferior a 1, y flotan hacia la superficie. El concentrado que no reaccionó, junto con cualquier otro mineral sólido lavado de las partículas de soporte pueden recuperarse, espesarse y filtrarse para su uso o venta como minerales reconcentrados. De esta manera, las corrientes de desechos, que tienen otras tecnologías de lixiviación, se reducen y, en cierta medida, se monetizan.

25 En general, en los procedimientos donde los minerales se tratan mediante lixiviación química y biolixiviación, las propiedades mecánicas e hidráulicas de los reactores de lixiviación en pilas son fundamentales para garantizar altas recuperaciones. Esto se logra aglomerando las partículas minerales finas alrededor de las partículas más grandes del mismo mineral. Esto resulta en pasar de un sistema donde las partículas finas y gruesas están dispersas, a uno donde las nuevas partículas aglomeradas se convierten en el tipo dominante dentro del reactor, maximizando la conductividad hidráulica y gaseosa del lecho del reactor, mejorando así la cinética total de recuperación de los contenidos metálicos oxidables.

#### 30 *Material de contiene metal*

El material que contiene metal puede ser un concentrado mineral, un mineral metálico o un producto de desecho que contenga un metal valioso de interés. Los minerales metálicos tradicionales son típicamente rocas con minerales que contienen metales. La concentración del mineral metálico en la roca determina el "grado" del mineral. Los minerales de alto grado tienen concentraciones relativamente altas de óxidos metálicos, sulfuros, silicatos o metales nativos. Históricamente, los minerales de menor grado y los concentrados minerales han demostrado no ser fuentes comercialmente viables para la extracción de metales usando tecnologías antiguas. En aspectos de la presente invención, los materiales metálicos pueden contener uno o más de los minerales que incluyen, entre otros: acantita, barita, bauxita, berilo, bornita, calcocita, calcopirita, cromita, cinabrio, cobaltita, columbita-tantalita, coltán, Dolomita, Galena, Hematita, Ilmenita, Magnetita, Malaquita, Molibdenita, Pentlandita, Pirolusita, Scheelita, Esperilita, Esfalerita, Uraninita (pitchblende), Wolframita o metales de baja reactividad en su forma nativa, como oro nativo, plata o platino. En un aspecto de la presente invención, el material que contiene metal o el concentrado mineral contiene un metal noble. En un aspecto de la presente invención, el material que contiene metal o el concentrado mineral contiene un metal precioso. En un aspecto de la presente invención, el material que contiene metal o el concentrado mineral contiene cobre. En un aspecto de la presente invención, el material que contiene metal o el concentrado mineral contiene plata. En un aspecto de la presente invención, el material que contiene metal o el concentrado mineral contiene oro.

En algunos aspectos de la presente invención, se usan concentrados minerales sulfurados procedentes del procedimiento de concentración gravitacional de sulfuros metálicos. Es deseable que el tamaño de las partículas del concentrado se encuentre entre 20 y 60 micrómetros (con un promedio entre 35 y 45 micrómetros) y que tenga un

contenido de agua entre 7 % y 12 %. Una vez que el concentrado se mezcla con un líquido, típicamente agua acidificada, o un ácido, y/o un inóculo microbiológico, se llama pulpa. Preferentemente, el líquido es una mezcla de agua y ácido sulfúrico y lo más preferentemente también contiene un inóculo microbiológico.

5 La presente invención es particularmente adecuada para el tratamiento de concentrados de calcopirita, calcita, calcocita, enargita y sulfuros de oro refactorios, entre otros.

10 En el contexto de la presente invención, las impurezas pueden relacionarse con cualquier material adicional más allá del mineral de metal puro que puede estar presente en varias cantidades en el concentrado mineral. Los materiales calcáreos son una impureza especialmente significativa debido a su ubicuidad en la corteza terrestre y sus propiedades fisicoquímicas que pueden reducir la eficiencia de las operaciones de lixiviación. Varias impurezas pueden considerarse indeseables porque, en las condiciones típicas que se encuentran en los procedimientos de lixiviación y biolixiviación, por ejemplo, son lo suficientemente solubles como para ingresar a la solución de riego donde se acumulan al reciclar o deben eliminarse como parte del procesamiento de la corriente de desechos, o pueden participar en reacciones químicas para formar depósitos sólidos que reducen la eficiencia de la operación de lixiviación y/o el procedimiento aguas abajo posterior, como el reciclaje de las partículas de soporte.

15 *Curado ácido*

El curado ácido es un procedimiento de pretratamiento donde se agrega ácido concentrado comercial a los minerales. En esta etapa, el ácido se distribuye de manera homogénea a todo el mineral para aumentar la cinética de la lixiviación. El ácido se pretrata químicamente para mejorar la cinética de la disolución del metal e inhibir la disolución de la sílice y actuar como agente aglutinante entre las partículas. Por lo tanto, los procedimientos de lixiviación química y biolixiviación de sulfuros metálicos, por ejemplo, pueden requerir la adición de grandes cantidades de ácido sulfúrico para asegurar que la formación de sílice coloidal no se active en el interior del lecho empaquetado y, como consecuencia, evite la canalización y las inundaciones. en sectores de un reactor o una pila. Además, permite que las especies oxidadas se empapen con sulfato como una forma de lograr la movilidad de estas en una solución como especies sulfatadas, ya que la extracción del valioso metal contenido requiere equivalentes ácidos. Esta tecnología genera una pulpa homogénea con una alta cantidad de ácido en el concentrado (generalmente se requieren entre 20 y 50 % de los equivalentes ácidos totales para la disolución total de estas especies); el resto de los equivalentes ácidos se agregan a las soluciones requeridas para facilitar el procedimiento de aglomeración de la pulpa sobre el soporte y a la solución de lixiviación usada para el riego en el reactor o lixiviación en pilas.

30 Opcionalmente, la sulfatación se puede realizar después del curado con ácido del concentrado mineral. La sulfatación es un procedimiento en el cual los metales oxidados se forman curando el curado ácido del mineral complejo en su forma de sulfato, hidratándose y aumentando su solubilidad.

*Biooxidación*

35 La biooxidación es la oxidación de la mena mineral huésped que contiene el componente metálico de interés, mediante el uso de microorganismos. En el contexto de los aspectos de la presente invención, la biooxidación puede realizarse como un pretratamiento antes de la aglomeración, como un pretratamiento realizado en aglomerados antes de la lixiviación, o como un co-tratamiento en aglomerados que se someten a una etapa del procedimiento de lixiviación.

*Aglomeración*

40 Para tener un contacto óptimo entre la superficie de la partícula y la solución de lixiviación, es necesario que una capa delgada de concentrado se una al soporte polimérico. Por ejemplo, la adhesión se puede lograr poniendo en contacto el soporte polimérico directamente con un mineral triturado o en polvo o un mineral pretratado (como un mineral curado con ácido), o contactando el soporte polimérico con una pulpa mineral. El contacto puede realizarse en cualquier dispositivo capaz de poner en contacto el mineral y el soporte de aglomeración, preferentemente con presión al contacto. En un aspecto de la invención, el dispositivo capaz de poner el mineral y el soporte de aglomeración en contacto entre sí es un dispositivo rotativo, preferentemente un tambor rotativo. Esta tecnología tiene flexibilidad ya que los soportes usados pueden ser de un tamaño o de una distribución estrecha de tamaños, evita la segregación de material en el tambor y, en consecuencia, se logran aglomerados de tamaño y humedad uniformes. Esta uniformidad otorga a los aglomerados atributos favorables para su transporte, manipulación, apilamiento y comportamiento mecánico en la etapa de lixiviación. De hecho, la formación de aglomerados es fundamental para hacer que los montones/reactores de lixiviación sean permeables a las soluciones de riego cuando el mineral a lixiviar está presente en una forma que comprende altos niveles de partículas finas. Como tal, el uso de técnicas de aglomeración dentro de la presente invención es particularmente preferido cuando el mineral a lixiviar se ha recogido como polvo o polvo de desecho, como en varias etapas de la extracción y refinación de minerales metálicos, o cuando los depósitos minerales que contienen los minerales metálicos están naturalmente presentes como arcilla, arena, limo, etc.

Preferentemente, las propiedades fisicoquímicas tanto del concentrado como del soporte están optimizadas, fomentando una excelente adhesión de una capa delgada de concentrado que se logra debido a que el concentrado



de pulpa está en solución con alta carga iónica.

Un aglomerado es el resultado del procedimiento de aglomeración, y consiste en una población de partículas de un soporte de aglomeración (tal como un polímero redondeado) cada una de las cuales está al menos parcialmente cubierta (preferentemente rodeada) por una capa delgada de concentrado mineral adherido, pulpa o concentrado mineral pretratado.

#### *Lixiviación*

La lixiviación es la disolución de metales de su mineral a través de la acción de una solución. En aspectos de la presente invención, la lixiviación puede ser lixiviación química o biolixiviación, o una combinación o híbrido de estos, ya sea de forma consecutiva o simultánea. Dentro del contexto de esta técnica, "riego" se refiere al procedimiento de aplicar una solución a una pila o reactor. En algunos aspectos de la presente invención, la solución de lixiviación puede contener adicionalmente uno o más de los siguientes componentes adicionales: un agente quelante, una sustancia para modificar el potencial de oxidación-reducción de la solución de lixiviación, un ácido para reducir el pH de la lixiviación solución. Los agentes quelantes preferidos son aminas de bases de Schiff.

#### *Lixiviación química*

La lixiviación química es el uso de uno o más productos químicos para disolver o desestabilizar selectivamente un componente dentro de un mineral metálico o concentrado mineral. Los productos químicos de lixiviación pueden dirigirse al mineral de metal puro en sí. Los productos químicos de lixiviación pueden apuntar a otros elementos, sales o compuestos dentro del concentrado mineral, o impurezas coextraídas con un mineral impuro o concentrado mineral. Los productos químicos de lixiviación pueden agregarse a un sistema de lixiviación como productos químicos puros, diluidos o mezclados con otros productos químicos, o generados por acción biológica dentro de la pila/reactor.

#### *Biolixiviación*

La biolixiviación es la extracción de minerales de su fuente mineral a través de la acción microbiana (hongos, bacterias, arqueas o combinaciones de los mismos). En aspectos preferidos de la presente invención, la biolixiviación se realiza por acción microbiana, más preferentemente a través de la presencia de varias bacterias mesofílicas acidófilas y/o bacterias termofílicas y/o bacterias termofílicas extremas. Dichas bacterias pueden sobrevivir a temperaturas entre 20 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 20 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 30 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 40 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 50 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 60 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 70 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 80 y 100 °C. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir entre 90 y 100 °C. En aspectos de la presente invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 5 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 4,5 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 4 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 3,5 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 3 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 2,5 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 2 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 1,5 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 1 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 0,8 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de 0,6 a pH 0,2. En otro aspecto de la invención, los agentes de lixiviación microbiana pueden sobrevivir dentro del intervalo de pH de pH 0,4 a pH 0,2. En aspectos de la presente invención, los agentes de lixiviación biológica o agentes bioxificantes comprenden una o más de las siguientes especies: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A. thiooxidans* o *Leptospirillum*, *Acidianus brierleyi*, *A. thermosulfooxidans*, *Sulfobacillus thermosulfoxidans*.

#### *Configuraciones de los reactores*

La presente invención es adecuada para su uso en una variedad de configuraciones de reactores que incluyen, entre otros, montones, reactores de tanque agitado, reactores de lecho fijo y reactores de columna. El reactor es fundamentalmente un contenedor de almacenamiento para las partículas de soporte de la presente invención, al menos parcialmente recubierto en una sustancia que contiene metal, mineral de metal o concentrado mineral.

Pilas. Para el tratamiento de relaves de grado bajo, se prefieren las pilas sobre los reactores de tipo tanque agitado. Los relaves se colocan sobre una base impermeable y se agrega una cantidad adecuada de solución de lixiviación.

Estas soluciones ácidas se filtran a través de los relaves permitiendo que las bacterias transformen los iones ferrosos en iones férricos y generando ácido para la disolución y solubilización del mineral. Estos montones se pueden airear de forma pasiva o activa (conjuntamente con un flujo de líquido o a través de tubos en el fondo de la pila). Un lecho de pila es un área preparada para apilar una pila. Un lecho de pila normalmente presenta una ligera inclinación (como una inclinación de aproximadamente el 3 %), una capa de arena, un revestimiento impermeable de polietileno, conductos de drenaje, una capa de grava, un canal de drenaje; y se pueden incluir conductos para un sistema de aireación en biolixiviación.

Reactores de tanque agitado. Esta configuración requiere que los reactores se alimenten con aire usando distribuidores que permitan el área máxima de transferencia de masa gas-líquido. Son más eficientes que los reactores de pila, en cuestión de días en lugar de semanas o meses en el caso de los reactores de pila. Una desventaja grave es que la cantidad de sólido que se puede mantener en suspensión a menudo está prácticamente limitada a aproximadamente el 5 % y ciertamente no más del 25 %. Además, tiene un alto costo de mantenimiento en comparación con los reactores de almacenamiento dinámico, por lo que solo los minerales de alto valor, como los concentrados que contienen oro, se tratan en dichos reactores. Este tipo de reactores no han demostrado ser económicamente factibles en el tratamiento de concentrados metálicos como calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) o enargita ( $\text{Cu}_3\text{AsS}_4$ ) que requieren temperaturas de 75 a 80 °C.

Reactores de columna. Los reactores de columna son reactores orientados verticalmente en los que el soporte (preferentemente partículas de soporte) puede apilarse, y la solución de riego, el inoculado de biolixiviación, etc. pueden ingresarse en la sección superior de la columna y el lixiviado se puede recoger en la parte inferior de la columna. Opcionalmente, se pueden ingresar sustancias gaseosas desde la base de la columna, para burbujear a través de la matriz de soporte.

Reactores de lecho fijo. Los reactores de lecho fijo son reactores sustancialmente horizontales con mayor longitud que altura que a menudo están presentes en una base horizontal sustancialmente plana o una inclinación muy leve.

#### *Solución líquida cargada (PLS)*

La solución de lixiviado rica en los metales de interés (solución líquida cargada, PLS), como el cobre, que se obtiene del reactor se recoge para la recuperación posterior del metal, normalmente mediante técnicas de extracción por disolvente y electrodeposición. Mientras que PLS es una solución cargada, preferentemente saturada con el valioso metal de interés (ya sea como iones o una sal soluble), un ILS es una solución medianamente cargada que proviene de reactores de lixiviación parcialmente agotados. El valioso contenido metálico de un ILS de lixiviado se controla para determinar cuándo se agota un reactor.

En algunos aspectos de la presente invención, los metales pueden recuperarse de la solución de lixiviado mediante técnicas de cementación usando reacciones redox (por ejemplo, la adición de chatarra puede usarse para sacar el cobre de la solución). En algunos aspectos de la presente invención, los metales pueden recuperarse de la solución de lixiviado mediante electrodeposición. La electrodeposición es un procedimiento electroquímico en el que el metal disuelto en un electrolito cargado se convierte en su forma metálica a través de la aplicación de una corriente continua (típicamente 300 A/m<sup>2</sup>) que forma un cátodo metálico. Un electrolito cargado es una solución acuosa de metal concentrado (por ejemplo, cobre a una concentración de 30 g/l), que alimenta el procedimiento de electrodeposición. En algunos aspectos de la presente invención, los metales pueden recuperarse de la solución de lixiviados mediante extracción con disolvente (SX), que es un procedimiento de concentración y purificación de metales disueltos en una solución acuosa pasándola a través de una matriz selectiva (por ejemplo y matriz orgánica) para el metal. Otros procedimientos para extraer metal del lixiviado adecuado para usar con la presente invención incluyen precipitación, intercambio iónico, electrodeposición y reducción de gases.

Después de la extracción de los metales del lixiviado (es decir, de la solución drenada del reactor), la solución resultante se denomina "solución de refinamiento". Es un objeto de algunos aspectos de la presente invención que la solución de refinamiento requiera un procesamiento adicional mínimo antes de que pueda reciclarse para usarse como una solución de riego en un reactor o desecharse de manera segura como una corriente residual.

#### EXPERIMENTAL

Durante el desarrollo de la presente invención, se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del polipropileno para confirmar que es adecuado como matriz de soporte de alto rendimiento para esta área de aplicación.

La humectación del polipropileno y de un concentrado de calcopirita de cobre se realizó mediante la técnica de flotación de película. La tensión superficial crítica, que determina el grado de humectación de ambos materiales, se determinó observando que el polipropileno se moja solo a tensiones superficiales por debajo de 23 mN/m, mostrando un carácter altamente hidrófobo. Por otro lado, en el caso de un concentrado rico en calcopirita, se observó una tensión superficial crítica de 44 mN/m que corresponde a un ángulo de contacto de 56,63°, que están muy cerca de los valores de ángulo de contacto encontrados en los concentrados industriales. Sin querer limitarse a la teoría, el fenómeno de adhesión de la primera capa del concentrado sobre las partículas de polipropileno puede explicarse por las fuerzas y la energía de interacción entre las partículas del concentrado y las del polipropileno, basado en el DLVO de Born Teoría asumiendo un medio poroso no saturado; tal como una configuración propuesta

5 en la presente invención. Las partículas de concentrado se unen fuertemente a la superficie del polipropileno en la zona mínima primaria y con condiciones de alta fuerza iónica en la solución, como las presentes en las operaciones de lixiviación de minerales de cobre. Si la fuerza iónica del medio disminuye, debido a la dilución de la solución de lixiviación o al lavado de las partículas, la teoría Born-DLVO predice la liberación de las partículas de concentrado debido a las fuerzas de repulsión entre las superficies. Finalmente, la adhesión entre las partículas concentradas en las capas más externas puede explicarse por la formación de puentes líquidos entre las partículas.

10 Se cree que la fuerza iónica juega un papel clave en el fenómeno de adherencia, desprendimiento o eliminación de las partículas de concentrado en el soporte polimérico. En general, las soluciones usadas en los procedimientos hidrometalúrgicos tienen un alto contenido de iones en la solución que aumenta la fuerza iónica, una condición que favorece significativamente la adhesión de partículas en el soporte de polipropileno de la presente invención. Esto también puede tener otros efectos positivos. Por ejemplo, puede haber partículas que transporten arsénico, mercurio, iones de plomo y otros y que se unan a la superficie de las partículas de la invención, evitando la contaminación de las soluciones de agua más adelante en el procedimiento. En consecuencia, dado que las partículas permanecen en el residuo final del ciclo de lixiviación, es posible lavarlas para llevar a cabo otro tratamiento en etapas posteriores para estabilizar los contaminantes peligrosos. Esta es una ventaja muy competitiva en comparación con las otras tecnologías que usan partículas minerales como material de soporte porque el control de los residuos de la pila en estos casos no es posible.

15 Es importante mencionar la presencia de partículas coloidales y bacterias en solución. En un reactor de lecho fijo, estos pueden acercarse a la interfaz de solución sólida y la interfaz de gas-líquido por el movimiento de la solución y por difusión. En el caso de que estas partículas tengan carga negativa, se enfrentarán a una interacción electrostática repulsiva, no solo con otras partículas como arcilla, sedimentos y bacterias, sino también con la carga en la interfase gas-líquido. Las fuerzas hidrodinámicas dentro del sistema actual pueden vencer la barrera repulsiva de la interacción electrostática y permitir la unión de partículas muy pequeñas en la interfase de la solución de gas. Se cree que, en esta condición, las fuerzas de interacción de van de Waals comienzan a actuar, que son función de las propiedades termodinámicas de las partículas de concentrado, así como de la solución de lixiviación.

20 El grosor deseado de la pulpa adherida a la matriz varía de 0,5 mm a 4 mm. Es preferible que el aglomerado húmedo tenga un espesor de 1 mm a 2 mm. Dado que las partículas de soporte tienen una distribución granulométrica de tamaños conocidos y fijos, la presente invención propone una solución muy conveniente al problema de lograr una porosidad muy eficiente del lecho empaquetado entre las partículas, lo que permite la circulación adecuada de la solución de riego en toda la pila. Esto mejora significativamente la cinética total del procedimiento debido al aumento de la velocidad efectiva de difusión de las diferentes especies en el núcleo de las fases y a través del aumento de la transferencia de masa en las interfases gas-líquido y líquido-sólido. Esto permite que el control de resistencia de la difusión y la transferencia de masa se minimicen en la cinética total.

25 Existen diversas tecnologías que abordan el problema de aglomeración de finos en partículas más grandes para mejorar las propiedades de percolación de las soluciones en el lecho de los reactores de lixiviación en montones, como el tambor de aglomeración (mina Pudahuel) y otros, como la patente US 6.083.730 cuyo procedimiento describe la aglomeración de sulfuros metálicos en un soporte de roca de gran tamaño. La presente invención reemplaza el soporte de roca con un soporte sintético que alienta a las partículas de concentrado a aglomerarse a su alrededor y no permite la lixiviación de componentes secundarios como los que están presentes en el caso de los soportes de roca. De esta manera, se evitan los riesgos de envenenamiento o inhibición de la función de los componentes biológicos empleados en algunos aspectos de la presente invención, que son responsables de mantener la actividad metabólica en el lecho del reactor.

30 Otra ventaja de la presente invención es que no se requiere inversión adicional para tratar las soluciones porque se usa un soporte sintético en lugar de uno mineral. Además, esta selectividad del sustrato ácido minimiza el consumo de ácido, lo que conduce a ahorros sustanciales aún más en los costos operativos. Además, el uso de una matriz de soporte de plástico estable, como el polipropileno, permite que las especies que no reaccionaron en el reactor de lixiviación puedan lavarse y recuperarse. Esto permite el reciclaje y/o monetización de componentes no reaccionados de los flujos de residuos en comparación con el uso anterior de otras tecnologías. Además, al usar una matriz plástica de baja densidad, esta tecnología disminuye los costos de energía en términos de transporte y carga en la operación, observados como ahorros de alrededor del 56 % en el consumo específico de energía en comparación con un sistema que usa un soporte mineral.

35 Además de tener propiedades mecánicas y térmicas que hacen que el soporte sintético sea resistente a las fuerzas de tracción y compresión, el material de soporte se caracteriza por tener una excelente resistencia a la abrasión y ser resistente a soluciones corrosivas y altas temperaturas típicamente fomentadas cuando se emplea el potencial de biolixiviación de microorganismos hipertermófilos (cerca de 80 °C).

40 Los reactores de columna se usaron como reactores a escala de banco en este estudio y permiten la validación de procedimientos de lixiviación en reactores de tipo de lecho empaquetado insaturado. La configuración de los reactores en columnas corresponde a una columna cilíndrica vertical hecha de material plástico. Las columnas usadas en este estudio tenían una altura de 2 a 6 m y un diámetro interno de 14 cm y se calentaron mediante una capa eléctrica controlada por un termopar. La temperatura del lecho de la columna se midió mediante la inserción de

un termómetro a través de la pared de la columna para acceder al material en el interior. Las columnas normalmente están hechas de tubos de polietileno o polipropileno. La columna se monta en un sistema de soportes y se cargó con el material aglomerado para lixiviar en la parte superior. La solución de riego se vertió en la parte superior para filtrarse por todo el lecho empaquetado. La base de la columna descansaba sobre un sistema de soporte de material empaquetado, debajo del cual había un espacio que permitía la recolección de las soluciones percoladas para la caracterización inmediata de su pH, Eh, concentraciones totales de Fe, Cu y ácido libre. Se inyectó aire en la columna desde la zona inferior de la columna para suministrar los gases necesarios. El aire se vio obligado a extenderse a través del material empaquetado en el lecho de la columna, usando una manguera con un lazo en la parte inferior de la columna que permitió que las soluciones de lixiviación salieran. Esta configuración actúa como un sello hidráulico que evita que el aire forzado dentro de la columna escape de esta manera.

#### *Solución de lixiviación*

La solución de lixiviación puede comprender agua, ácido sulfúrico y un cultivo de una o más especies de microorganismos en suspensión en una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10 g/l y un pH entre 1 y 2,5. Los microorganismos preferidos, adecuados para su uso en procedimientos de lixiviación en aspectos de la presente invención incluyen, entre otros, *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Sulfolobus acidocaldarius*, *Acidianus brierleyi*, *Sulfolobus metallicus*, *Leptospirillum ferrooxidans*, *Thiobacillus thiooxidans* sin excluir otros. Una vez que el reactor de lixiviación está preparado, esta solución se define como la "solución de riego", ya que se puede volver a aplicar a la pila o al reactor tantas veces como sea necesario. El procedimiento de aglomeración comienza con una pulpa de los concentrados en una solución ácida fuerte, opcionalmente con microorganismos inoculados y/o soluciones muy ácidas que contienen altas concentraciones de iones de cloruro (como se puede proporcionar al disolver NaCl y/o CaCl<sub>2</sub>). La pulpa comprende preferentemente una relación en peso sólido/ solución de entre el 75 y el 80 % p/p de sólidos.

La técnica de curado ácido también se puede usar ya que los procedimientos de lixiviación requieren la sulfatación de las especies metálicas contenidas, con el fin de hacer que la especie sea soluble en medios acuosos. Se cree que la aglomeración con altas cargas de ácido fomenta la recuperación secuencial acelerada de metales valiosos (tal como el cobre) en la etapa de lixiviación.

La inoculación de agentes de biolixiviación como parte de algunos aspectos de la presente invención se puede llevar a cabo mediante la adición de una o más de la solución de pulpa, la forma inicial de la solución de riego, o conjuntamente con la adición de la solución de riego parcialmente usada (es decir, entre la recolección en la base del reactor/pila y la redistribución a la parte superior del mismo u otro reactor/pila) durante cualquiera o todos los ciclos de lixiviación.

#### *Reclamación de la pila*

Una vez que se dedica el tiempo dedicado a la lixiviación del mineral o el concentrado aglomerado sobre la plataforma de lixiviación en pilas, se eliminan los sistemas de riego, ya sean aspersores o goteros y superiores, y se trabaja para eliminar el material apilado en los vertederos de residuos. el material apilado aún puede estar sujeto a riego, pero bajo condiciones de mucho menos control con respecto a lo que estaba acostumbrado en la lixiviación en pilas. Existen diferentes mecanismos y equipos usados en la tarea de levantar la pila de la lixiviación, pero depende en gran medida del tamaño de la operación en cuestión. En particular, se puede mencionar el uso de un recuperador de rueda dentada, normalmente asociado a los sistemas de cintas transportadoras, para transportar la cola a su sitio de contención, o el uso de excavadoras normalmente asociadas con los sistemas de transporte que usan camiones volquete.

Dada la baja densidad del soporte de aglomeración propuesto en la presente invención, se estima que el costo y la energía requeridos para levantar el material ya procesado en la pila o el reactor mejoran significativamente en términos del desgaste del equipo y la eficiencia energética global del procedimiento.

#### *Lavado y recirculación de soporte de aglomeración*

En el procedimiento de lixiviación en pilas y excepto en el caso propuesto por la tecnología GEOCOAT en la que se procesa el concentrado asociado a un soporte de partículas de roca como sustrato de aglomeración para los concentrados, los minerales ya procesados se llevan a su sitio de destino final o vertederos de residuos de lixiviación.

En la presente invención, el material tratado pasa a través de una etapa de lavado que ocurre en una lavadora tipo Trommel. Mediante la acción mecánica giratoria y la solución de lavado añadida, las partículas finas del concentrado que no reaccionaron o los precipitados formados en la etapa de lixiviación se desprenden de las partículas de soporte. La idea de esta etapa es separar las partículas finas de las grandes, lo que las mantiene como un medio, por un lado, para recuperar los metales valiosos contenidos en los concentrados no reaccionados, y, por otro lado, para recuperar las partículas grandes. para reusarlos en un nuevo ciclo de lixiviación.

Debido a la baja densidad de la matriz de soporte propuesta en esta invención, se facilita enormemente el lavado y la separación de las partículas no reaccionadas de la etapa de matriz de soporte, dando como resultado mejoras en la eficiencia del procedimiento y menores costos operativos.

**Ejemplos****Ejemplo 1: Propiedades fisicoquímicas del soporte polipropileno.**

Las partículas de soporte estaban hechas de polipropileno, con un diámetro entre 3 y 20 mm. Dicho material era resistente a la deformación y degradación a temperaturas de hasta al menos 100 °C.

- 5 - Se realizaron pruebas al soporte colocándolo en un entorno de pH 0,2 y verificando que no sufriera ninguna modificación física o química.
- Fue inerte a la acción de microorganismos típicamente empleados en biolixiviación y biooxidación.
- Para una prueba de recuperación del soporte, el soporte de polipropileno, después de su uso, demostró ser fácilmente recuperable al lavarlo con agua debido a su baja densidad y buena fluidez.
- 10 - Las pruebas de carga establecieron la proporción del concentrado que se puede aglomerar efectivamente en la partícula de soporte de plástico. Para estas pruebas, se usaron dos tipos de matrices de soporte de polipropileno, una en forma de microgránulo (cilíndrico) de 2 a 5 mm de diámetro y la otra en forma de esferas de 20 mm de diámetro.

15 El concentrado que se va a aglomerar, previamente pulpado mediante la adición de una solución de agua acidulada con 10 g/l de ácido sulfúrico, a una concentración final del 80 % de sólidos se añadió a un peso y volumen conocido de una matriz plástica seca que actuó como un soporte. El resultado final fue una relación de carga de concentrado a soporte entre 0,5 a 0,8 p/p.

**Ejemplo 2: Lixiviación de Sulfuro de Calcopirita en columna.**

20 El procedimiento de aglomeración se llevó a cabo en tambores de aglomeración, en los que se añadieron ácido en un intervalo de 40 a 60 kg de ácido/t de concentrado, agua en un intervalo de 60 a 90 kg/t de concentrado e inóculo bacteriano viable activo. La velocidad de rotación fluctuó entre 5 a 15 rpm y el tiempo de residencia varió entre 1 a 3 minutos hasta que el espesor del concentrado adherido alcanzó de 1 a 4 mm. Las partículas con aglomerado previo se cargaron en columnas de polipropileno de tal forma que se generó un lecho empacado homogéneo. Sobre este lecho se hizo circular una solución fresca de lixiviación. La columna funcionó continuamente y la solución de lixiviación se vertió en el centro de la parte superior de la columna a una velocidad de superficie en un intervalo de 7 a 20 l/hm<sup>2</sup>. La solución contenía de 35 a 45 mg/l de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, de 35 a 45 mg/l de MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O y de 35 a 45 mg/l de K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>. Esta configuración logró las condiciones óptimas de transporte de impulso, calor y masa para cada partícula de soporte.

30 Después de la lixiviación química con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> durante algunas horas, se introdujo por la parte superior de las columnas una solución fresca que contenía ion ferroso en concentraciones entre 1 a 2,5 g/l. De forma regular se midió el pH y el potencial Eh de la solución, así como las concentraciones de Fe<sup>3+</sup> y Fe<sup>2+</sup>, cobre total, ácido libre y la concentración de bacteria en solución. Las columnas de lixiviación se mantuvieron funcionando durante 320 días. El aire se administró en la base de cada columna con un perno de compresión. Este aire penetró en la base de la columna a través de convección forzada.

35 Resultados: Recuperación superior al 90 % de Cu, superior al 55 % de Fe, en 320 días, y consumo neto de ácido negativo.

**Ejemplo 3: Aglomeración con inóculo.**

40 Durante la etapa de aglomeración, los concentrados se repulparon en ácido y agua donde se inocularon con un cultivo mixto de sulfuro-bacteria oxidante de naturaleza termofílica extrema. Este cultivo se había usado previamente en biolixiviación en biorreactores de concentrados de sulfuro de cobre y minerales. El cultivo contenía especies que incluyen *Acidothiobacillus ferrooxidans*, *Sulfobacillus metallicus*, *Acidianus sp.*, *Leptospirillum sp.*, entre otras.

45 El cultivo se hizo crecer con muestras de diferentes fuentes. Algunos se obtuvieron de ambientes de aguas termales y a temperaturas de 68 °C y se suplementaron con extracto de levadura al 0,2 %. El sustrato para el crecimiento de estas bacterias fue un concentrado mineral finamente dividido de Pucobre y se colocó en diferentes matraces agitados al 5 % p/v en medio basal OK suplementado con extracto de levadura al 0,2 % p/v para así tener el inóculo para las columnas. Estos inóculos iniciales se cultivaron por primera vez en un tanque agitado de 30 l, 5 % p/v de concentrado de mineral en medio basal OK suplementado con extracto de levadura 0,2 %. El volumen de operación se mantuvo a 70 °C y agitado a 200 rpm mediante un agitador mecánico de aspas y aireado a una velocidad de 3 l/min. Para inocular cada columna se usó inóculo con una población del orden de 10<sup>8</sup> a 10<sup>9</sup> bacterias/ml, lo que se traduce en una densidad de población final de siembra del orden de 10<sup>7</sup> a 10<sup>8</sup> bacterias/g de concentrado de mineral. Para mantener una retención escalable en cada columna, se usó una relación de 0,5 y 0,8 kg de concentrado/masa de soporte.

**Ejemplo 4: Lixiviación con diferentes soportes y medios lixiviantes.**

55 Las pruebas se llevaron a cabo en 6 columnas de 2 m de altura. Las pruebas se llevaron a cabo durante 150 días para las pruebas en medio cloruro (columnas 1, 3, 4) y durante 300 días para medios biológicos (columnas 2, 5 y 6).

Todos los experimentos se mantuvieron a un pH menor a 2, mediante la adición de ácido sulfúrico concentrado adicionado a la solución de riego. Una vez que las soluciones de salida se estabilizaban bajo este valor, no se reajustó el pH.

5 Las condiciones aplicadas, el tipo de soporte usado y los porcentajes de recuperación se muestran en la siguiente tabla (Tabla 2).

Tabla 2

Columna	Matriz	Condición	Tasa de Irrigación (l/h/m <sup>2</sup> )	Velocidad de Aireación (l/min)	Temperatura (°C)	Alimentación Fresca (Kg)			Grava (Kg)			Cabeza		Grava		Recuperación (%)	
						Concentrado	Matriz	Concentrado	Matriz	Grado de Cu (%)	Grado de Fe (%)	Grado de Cu (%)	Grado de Fe (%)	Cu	Fe		
	Microgránulos	NaCl + CaCl <sub>2</sub>	12	4	20	11,3	14,0	8,3	13,8	27,3	30,0	19,0	28,6	49,3	30,4		
	Microgránulos	NaCl + CaCl <sub>2</sub>	12	4	20	13,0	13,0	9,6	12,9	27,3	30,0	16,9	25,3	54,4	37,6		
	Esferas	NaCl	12	4	20	5,7	3,2	4,8	3,1	27,3	30,0	22,5	29,0	30,5	18,1		
Columna	Matriz	Condición	Tasa de Irrigación (l/h/m <sup>2</sup> )	Velocidad de Aireación (l/min)	Temperatura (°C)	Alimentación Fresca (Kg)			Grava (Kg)			Cabeza		Grava		Recuperación (%)	
						Concentrado	Matriz	Concentrado	Matriz	Grado de Cu (%)	Grado de Fe (%)	Grado de Cu (%)	Grado de Fe (%)	Cu	Fe		
	Microgránulos	Bacterias	12	4	55	11,8	12,7	3,2	12,5	27,3	30,0	12,1	26,4	87,9	76,0		
*	Esferas	Bacterias	12	4	50	8,4	3,4	3,8	3,3	27,3	30,0	5,9	23,6	90,2	64,4		
*	Esferas	Bacterias	12	4	52	8,6	3,4	4,2	3,3	27,3	30,0	6,9	23,6	87,7	61,6		

\* C5 y C6 están duplicados

5 Los grados dados de alimentación de cabeza y grava del primer conjunto de prueba en columnas se obtuvieron por un promedio de los resultados obtenidos en 4 laboratorios diferentes. Estos paquetes, entregados a los laboratorios, se prepararon por una empresa externa (IDICTEC) en la que se hicieron selecciones para la entrega de muestras. Los muestreos se llevaron a cabo mediante muestras tipo rifle y, después, cono y cuarteamiento. Las muestras se enviaron a los laboratorios GEOLAQUIM, SGS, IDICTEC y a un laboratorio interno.

**Ejemplo 5: Lavado y recuperación del soporte polimérico.**

Al término de la lixiviación, se lavó el soporte con agua en un tambor rotatorio, liberando todos los elementos adheridos y dejando el soporte limpio y disponible para el próximo ciclo de operación.

10 El concentrado residual recuperado puede ser posteriormente procesado para obtener las especies de valor contenidas en él o ser dispuesto adecuadamente en caso de no tener valor económico.



**REIVINDICACIONES**

1. Un procedimiento de lixiviación de material que contiene metal o concentrados de minerales metálicos que comprende las etapas:
  - 5 a. Adherir concentrados minerales o un material que contiene metal de manera estable a un soporte para formar aglomerados; en los que dicho soporte se **caracteriza porque** está hecho de partículas de polipropileno no porosas de entre 3 y 20 mm, de gravedad específica menor que 1, estable en soluciones fuertemente ácidas de pH1 - pH4, resistente a la abrasión y no se deforma a temperaturas de hasta 60 °C;
  - b. Transportar los aglomerados a un sitio de procesamiento;
  - 10 c. Cargar los aglomerados en un reactor de lecho empaquetado o formando una pila de aglomerados;
  - d. Lixiviar el concentrado mineral o material que contiene metal mediante el riego con agentes químicos y/o biológicos presentes en una solución ácida;
  - e. Opcionalmente, suministrar aire forzado al reactor o a la pila de aglomerados en una dirección contracorriente en relación con la de la solución de riego;
  - 15 f. Recuperar la solución cargada o "PLS" que se filtró en el reactor o en la pila para su tratamiento posterior;
  - g. Recuperar los residuos sólidos del reactor o la pila;
  - h. Separar los sólidos residuales, concentrados minerales sin blanquear y cualquier precipitado formado;
  - i. Reutilizar soporte en otro ciclo del procedimiento de lixiviación que comprende las etapas d - h.
2. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con la reivindicación 1, en el que el soporte se **caracteriza porque** las partículas tienen bordes redondeados y son de forma lenticular, cilíndrica, discoidal, cóncava, convexa o esférica.
- 20 3. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en el que las partículas de dicho soporte están huecas o son sólidas.
4. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1-2, en el que las partículas de dicho soporte están recubiertas al menos parcialmente en concentrados minerales.
- 25 5. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 4, **caracterizado porque** dicho procedimiento carga entre 0,5 y 0,8 kg de concentrado mineral por kilogramo de soporte.
6. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 5, **caracterizado porque** el reactor de lecho empaquetado o la pila de aglomerados funciona de manera no saturada con una tasa de irrigación de hasta 20 l/hm<sup>2</sup>, evitando los flujos preferenciales de la solución de riego. y permitiendo flujos uniformes de aire en una dirección contracorriente.
- 30 7. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6, **caracterizado porque** el concentrado mineral soportado o el material que contiene metal puede ser un sulfuro primario o un metal base secundario, un mineral rico en metales nobles unidos a sulfuros, un concentrado de hierro o un concentrado con altas cantidades de impurezas que dificultan el procedimiento.
- 35 8. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** se añaden agentes oxidantes biológicos y nutrientes en la etapa de aglomeración y/o en la solución de riego.
9. Un procedimiento de lixiviación de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado porque** se pueden añadir agentes oxidantes químicos en la etapa de aglomeración y/o en la solución de riego.