

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 940 464**

51 Int. Cl.:

C22B 11/00 (2006.01)

C22B 15/00 (2006.01)

C22B 3/12 (2006.01)

C22B 3/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **04.09.2014 PCT/AU2014/000877**

87 Fecha y número de publicación internacional: **12.03.2015 WO15031943**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **04.09.2014 E 14842873 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **16.11.2022 EP 3041964**

54 Título: **Proceso para recuperar cobre y/o metales preciosos**

30 Prioridad:

04.09.2013 AU 2013903380

23.06.2014 AU 2014902389

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
08.05.2023

73 Titular/es:

**MINING AND PROCESS SOLUTIONS PTY LTD.
(100.0%)**

**Suite 11, 16 Brodie Hall Drive
Bentley, WA 6102, AU**

72 Inventor/es:

**EKSTEEN, JACOBUS JOHANNES y
ORABY, ELSAYED ABDELRADY**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 940 464 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

Proceso para recuperar cobre y/o metales preciosos

5 **Campo técnico**

Se describe un proceso para la recuperación de un metal seleccionado de cobre y metales preciosos de materiales que contienen cobre y/o metales preciosos. El proceso se puede usar para recuperar metales de menas, concentrados o colas de menas, o de otros materiales que contienen metales, incluidos materiales de joyería, chatarra electrónica y otros materiales de desecho. El proceso puede usarse particularmente en el contexto de la lixiviación de menas pobres, concentrados o colas de menas en un enfoque de lixiviación *in situ* o en pila.

Como se usa en la presente memoria, el término “metal precioso” significa oro, plata y metales del grupo del platino: rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino. Sin embargo, de estos metales preciosos, el proceso es particularmente aplicable a la recuperación de oro y/o plata y, por lo tanto, la explicación se centrará en estos dos metales preciosos.

Antecedentes de la técnica

La recuperación de cobre y/o metales preciosos se realiza rutinariamente mediante procesos hidrometalúrgicos. Se han utilizado diferentes tipos de reactivos para lixiviar el cobre y/o metales preciosos. Muchos de esos reactivos tienen propiedades desventajosas, tales como toxicidad, coste, falta de selectividad y bajas tasas de extracción, como se explica en detalle a continuación.

Metales preciosos

En la lixiviación de metales preciosos, tales como oro y/o plata, los lixiviantes incluyen cianuro, tiosulfato, tiocianato, haluros y halógenos (tales como cloruros, bromuros y yoduros y cloro, bromo y yodo) y tiourea. De estos, el cianuro sigue siendo el reactivo predominante que se aplica a escala industrial para menas de oro y oro-plata aunque, desde 2012, se han implementado sistemas de tiosulfato amoniacal de cobre en algunas minas de oro y centros de procesamiento a escala industrial. Los haluros (cloro y cloruros en particular) se suelen usar en la refinación final de mezclas de oro y plata con impurezas y doré (aleación de oro y plata). Además, muchos mineros artesanales aún usan el mercurio metálico, que es muy venenoso y nocivo para el medio ambiente. A pesar de ser un reactivo de lixiviación (lixivante) consistente, el uso de cianuro de sodio y cianuros de otros metales alcalinos (tales como potasio) y metales alcalinotérreos (tales como calcio), todos denominados “cianuros”, plantea una serie de desafíos, principalmente debido a su toxicidad, restricciones regulatorias, alta huella de carbono y baja selectividad en menas pobres. Esto es particularmente problemático para las menas de oro con alto contenido de cobre y/o alto contenido de plata ya que el cobre suele estar presente en niveles de aproximadamente 1000 veces la concentración de oro (plata a menudo 5-50 veces la concentración de oro), lo que conduce a un consumo excesivo de cianuro, y la eliminación del cianuro disponible para la lixiviación del oro. El cianuro también es un reactivo caro, de modo que usarlo para metales de menor valor como el cobre (y menos, para la plata) rápidamente se vuelve poco rentable, no solo para la lixiviación, sino también debido a los efectos aguas abajo (p. ej., competencia con oro durante la adsorción en carbono activado, elución y tratamiento de residuos). Además, genera cianuros Weak Acid Dissociable (disociables en ácido débil - WAD) que requieren desintoxicación/destrucción del cianuro o procesos de recuperación.

Los actuales lixiviantes alternativos al cianuro también plantean muchas dificultades. A pesar de que el tiosulfato de sodio es el principal competidor como lixivante para el oro, es caro, requiere cobre adicional (como Cu^{2+}) como oxidante (si no está presente en la mena de oro) y amoníaco, volátil y nocivo, para estabilizar el sistema de lixiviación. Es aplicable solo a un número limitado de menas de oro. Además, no puede producirse económicamente en el sitio, requiere una separación compleja aguas abajo y no es biodegradable.

Los desafíos clave de los lixiviantes inorgánicos alternativos se exponen a continuación:

Lixivante	Detractores
Tiocianato de sodio en medios ácidos	Mala solubilidad de la plata frecuentemente asociada al oro. Corrosión debida al ambiente ácido Toxicidad Muy estable (poco biodegradable) No se puede producir en el sitio
Tiourea	Carcinógeno y tóxico. Caro Nocivo para el medio ambiente

	No se puede producir en el sitio.
5	Haliuros (cloruro-bromuro-yoduro)
10	Limitado al oro en el concentrado de flotación en lugar de mena pobre. Corrosión y altos costes de capital Mala selectividad (movilización de la mayoría de los metales). Mala solubilidad de otros metales preciosos, tales como la plata. No biodegradable. Nocivo para el medio ambiente.

Cobre

Actualmente, se produce más del 20 % de la producción mundial de cobre usando procesos hidrometalúrgicos, particularmente por procesos de lixiviación ácida en pilas (o biolixiviación en pilas)-extracción de disolvente-extracción electrolítica para menas pobres.

Se sabe que la presencia de minerales de cobre con oro plantea muchos problemas durante la cianuración de menas de oro, tales como alto consumo de cianuro con baja extracción de oro y efectos no deseables en la recuperación de oro durante los procesos aguas abajo. Un proceso previo para el tratamiento de estas menas se ha centrado en la lixiviación selectiva del oro de menas de cobre y oro con cianuro y amoníaco. Sin embargo, el éxito de este proceso es sensible al tipo de mena. Si bien este proceso puede ser eficaz para tratar menas oxidadas, se descubrió que el tratamiento de las menas de transición o sulfídicas recuperó mal el oro y requirió altas concentraciones de reactivo. Los minerales de cobre consumen aproximadamente 30 kg/t de NaCN por cada 1 % de cobre reactivo presente, haciendo poco rentable la cianuración convencional de menas o concentrados de cobre y oro. Además, tanto el cianuro como el amoníaco tienen efectos nocivos para el medio ambiente.

De los minerales de sulfuro de cobre, la calcopirita es la más refractaria a la lixiviación en medios ácidos (ácido sulfúrico, por sí mismo o junto con ácidos clorhídrico o nítrico, o asociado a la biolixiviación), que es el proceso hidrometalúrgico convencional para extraer cobre, y la poca recuperación de cobre es la norma, requiriendo temperaturas elevadas para una extracción de cobre aceptable. Se ha apreciado que se forman varias capas de pasivación dependiendo de las condiciones de lixiviación, lo que ralentiza la reacción de lixiviación significativamente, o detiene la reacción, dependiendo de la naturaleza superficial de la calcopirita y las condiciones particulares de lixiviación química utilizadas. En menas de oro y cobre, la calcopirita de lixiviación lenta contribuye al consumo de cianuro y, en algunos casos, la oclusión del oro.

“FENG, D. y col., “The role of amino acids in the thiosulphate leaching of gold”, MINERALS ENGINEERING, 12 abril de 2011, vol. 24, n.º 9, páginas 1022-1024”, para abreviar, “Feng” trata la lixiviación con tiosulfato y enseña que los aminoácidos forman complejos más estables con iones cúpricos que el amoníaco, dando como resultado un menor consumo de tiosulfato debido a una interacción reducida entre el tiosulfato y los complejos de cobre.

WO 2010/121317 A1 se refiere a un método y sistema para la extracción de oro de concentrados de oro que implican disolver el oro en un licor acuoso, la extracción electrolítica para proporcionar concentrados de oro asociados al cátodo y procesar los concentrados.

CA- 2.648.491 A1 se refiere a un método para la recuperación de metales preciosos de solución acuosa. CA-2.648.491 A1 describe un método para recuperar metales preciosos en forma sólida a partir de una solución acuosa que contiene iones de metal precioso. El método tiene las etapas de combinar una solución acuosa que contiene iones de metal precioso de aproximadamente pH 7 o superior con iones ferrosos, y recoger el sólido que contiene metales preciosos.

En US-3.865.580A se recupera cobre de fuentes nativas y fuentes de desecho por solución acelerada de estas en amoníaco más solución de carbonato de amonio con un catalizador que oxida el cobre del metal de cobre al estado cuproso y del estado cuproso al cúprico, siendo el catalizador hierro quelado, que se devuelve a su estado catalítico férrico efectivo, y se mantiene en solución como un quelato por la oxidación del medio en el que tiene lugar la solución.

Hay varias minas grandes de cobre y oro en Australia y la región de Asia Pacífico. Estas plantas producen concentrados de cobre y oro y los envían para la fundición de cobre y recuperación de oro a partir de residuos anódicos (p. ej., Telfer, Mt Carlton, Boddington y Cadia Valley, etc.). Sin embargo, el aumento del contenido de pirita aurífera y pirita arseniana aurífera en las menas de cobre produce concentrado de cobre pobre. Además, la presencia de arsénico limita la extracción en masa de flotación de concentrados ricos en calcopirita, de modo que una parte significativa del oro debe recuperarse por gravedad y lixiviación de las colas de flotación. El transporte del concentrado pobre al extranjero suele ser poco rentable. Por lo tanto, un proceso alternativo sería útil para recuperar cobre y/u oro de tales menas pobres o difíciles.

Por consiguiente, existe la necesidad de un proceso alternativo de recuperación de metales que use lixiviantes baratos e inocuos para el medio ambiente para la recuperación de metales preciosos y/o de cobre. También existe la necesidad de un proceso de recuperación respetuoso con el medio ambiente con un coste bajo (operativo y de capital) como método de extracción alternativo para el cobre y/o metales preciosos. También existe la necesidad de un proceso de recuperación respetuoso con el medio ambiente que pueda usarse para lixiviar el cobre y/u oro y/o plata a través de la lixiviación *in situ*, lixiviación en la explotación, lixiviación en pilas o lixiviación en cubas de la mena o los concentrados de mineral. Existe una necesidad adicional de un proceso eficiente y respetuoso con el medio ambiente para recuperar selectivamente cobre de menas de cobre/metales preciosos y concentrados de menas.

Breve descripción de la invención

Según la presente descripción, se proporciona un proceso según la reivindicación 1 u 11.

El proceso puede comprender la lixiviación de cobre de un material que contenga cobre.

De forma alternativa, el proceso puede comprender la lixiviación de cobre de un material que contenga cobre y metales preciosos.

De forma alternativa, el proceso puede comprender la lixiviación de cobre y un metal precioso de un material que contenga cobre y metales preciosos.

De forma alternativa, el proceso puede comprender la lixiviación de metales preciosos de un material que contenga cobre y metales preciosos.

De forma alternativa, el proceso puede comprender la lixiviación de metales preciosos de un material que contenga metales preciosos.

La presente descripción también proporciona una solución de lixiviación alcalina para usar en el proceso anterior que comprende un aminoácido y/o un derivado suyo, y que tiene un pH de al menos 9. En una realización, el pH es al menos 10.

Las especies alcalinas en el lixivante pueden comprender uno o más de cal muerta (hidróxido de calcio), sosa cáustica (hidróxido de sodio), potasa cáustica (hidróxido de potasio), sosa comercial (carbonato de sodio) o hidróxido de amoniaco/amonio.

El lixivante alcalino puede contener un oxidante. Se ha descubierto que la presencia de un oxidante es particularmente ventajosa cuando el proceso se usa para la recuperación de un metal precioso. El oxidante puede ser un gas oxidante, tal como oxígeno o aire, o un peróxido, tal como peróxido de hidrógeno y/o peróxido de calcio, u otros oxidantes tales como dióxido de manganeso.

En una realización, el material que contiene metal comprende menas, concentrados o colas. La mena o el concentrado puede ser uno o más de mena de oro oxidado, sulfuroso o carbonoso. La mena puede ser rica o pobre.

En una realización, el proceso se usa para recuperar metales de una mena pobre o un concentrado de mena.

Aunque la siguiente explicación se centrará en el uso del proceso para recuperar metales de menas, concentrados o colas, debe entenderse que el proceso no se limita a tal uso y puede usarse para recuperar metales de otras fuentes tales como materiales reciclados, polvos, chatarra electrónica, joyería, materiales de desecho, etc.

Como se apreció anteriormente, los principales lixiviantes en la solución de lixiviación son reactivos respetuosos con el medio ambiente, tales como aminoácidos opcionalmente junto con un oxidante tal como peróxido de hidrógeno.

El lixivante incluye uno o más aminoácidos o derivados de los mismos. El aminoácido puede comprender un aminoácido alfa. El aminoácido puede comprender uno o más de glicina, histidina, valina, alanina, fenilalanina, cisteína, ácido aspártico, ácido glutámico, lisina, metionina, serina, treonina y tirosina.

En una realización, el aminoácido es glicina. La glicina es un aminoácido simple que es fácil y barato de producir a escala industrial. La glicina tiene una serie de ventajas sobre muchos otros lixiviantes: es un reactivo ambientalmente seguro y estable, pero es destructible enzimáticamente y se metaboliza fácilmente en la mayoría de los organismos vivos. Debido a su acción complejante, la glicina también puede mejorar las solubilidades respectivas de metales preciosos y cobre en soluciones acuosas, la glicina se produce actualmente a niveles similares, a un precio comparable o más barato que el cianuro de sodio. Sin desear imponer ninguna teoría, se cree que la glicina forma un complejo fuerte con oro(I) como $\text{Au}(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COO})_2^-$ y con cobre(I) como $\text{Cu}(\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COO})_2^-$. La constante de estabilidad del oro con glicina a pH 9 es 18,0 y del cobre con glicina a pH 9 es 18,9.

El derivado de aminoácido puede comprender un péptido, tal como un di- o tripéptido.

En otra realización, el lixiviante comprende una combinación de dos o más aminoácidos. La combinación de aminoácidos puede comprender glicina y uno o más de otros aminoácidos. Por ejemplo, la combinación puede comprender glicina e histidina.

El aminoácido puede producirse mediante bacterias o procesos abióticos. Puede obtenerse a través de canales comerciales normales o producirse en la explotación. Si se produce en la explotación, el aminoácido puede producirse individualmente o en combinación en el sitio de procesamiento de la mena con un medio nutriente apropiado por una variedad de microorganismos y bacterias, tales como (pero sin limitarse a):

- *Achromobacter paradoxus*
- *Aeromonas hydrophila*
- *Aeromonas sp.*
- *Bacillus circulans*
- *Bacillus megaterium*
- *Bacillus mesentericus*
- *Bacillus polymyxa*
- *Bacillus subtilis*
- *Bacillus sp.*
- *Candida sp.*
- *Chromobacterium flavum*
- *Penicillium sp.*
- *Pseudomonas aeruginosa*
- *Pseudomonas liquefaciens*
- *Pseudomonas putida*
- *Pseudomonas sp.*
- *Sarcina flava*.

La concentración de aminoácido en la solución de lixiviación puede ser al menos 0,01 M, tal como un mínimo de 0,1 M. En una realización, la concentración es un máximo de 2 M. La concentración dependerá del entorno de lixiviación particular. Por ejemplo, en una aplicación de lixiviación en pilas, la concentración puede ser un mínimo de 0,01 M. En una aplicación de lixiviación en pilas, el máximo puede ser 0,1 M. En otra realización, tal como en una aplicación de lixiviación en tanques, la concentración puede ser un máximo de 1 M. En otra realización del proceso, la concentración de aminoácido puede ser de 0,5 a 1 M.

Se ha descubierto que la lixiviación de metales usando aminoácidos puede mejorarse en presencia de un oxidante en un medio alcalino. Se ha descubierto que un oxidante puede aumentar ligeramente la disolución de cobre, pero tiene un efecto más pronunciado sobre la disolución de metales preciosos.

En una realización, el oxidante contiene oxígeno, tal como peróxido de hidrógeno o un gas que contenga oxígeno. Otros oxidantes que pueden considerarse son dióxido de manganeso, permanganato de potasio o peróxido de calcio. Sin embargo, otros oxidantes (distintos del oxígeno puro o peróxido de hidrógeno) pueden ser nocivos para el medio ambiente y pueden introducir nuevas especies metálicas no deseables.

Se ha descubierto que el peróxido de hidrógeno es particularmente efectivo debido a su bajo coste y tiene propiedades inocuas para el medio ambiente (se descompone en agua). Su solubilidad también es relativamente estable a las temperaturas elevadas del proceso, en comparación con un gas que contenga oxígeno (tal como O₂ o aire). La cantidad de peróxido en solución puede ser de al menos un 0,005 % en peso, tal como un 0,5 % en peso o superior. Nuevamente, la cantidad de peróxido usada dependerá del entorno de lixiviación: p. ej., un mínimo de un 1 % en peso de peróxido de hidrógeno puede ser adecuado para la lixiviación en tanques, y un mínimo de un 0,1 % en peso para

las operaciones de lixiviación en pilas. La cantidad también dependerá del metal que se lixivia. Como se ha mencionado, la presencia de un oxidante tal como H_2O_2 puede aumentar ligeramente la solubilidad del cobre. Sin embargo, un oxidante tiene un mayor efecto de solubilidad de metales preciosos y generalmente, cuanto mayor es la concentración de peróxido, mayor es la cantidad de disolución de metales preciosos. Un límite superior adecuado de peróxido puede ser un 5 % en peso. En una realización, la concentración máxima de peróxido es de un 1 %. Las soluciones se formarán, típicamente, a partir de una solución industrial acuosa a un 30 % en peso que se puede obtener fácilmente.

El pH de la solución de lixiviación o la suspensión es alcalino. Puede tener un pH dentro de un intervalo amplio entre pH 6 a 13. Se pueden usar álcalis tales como hidróxido de sodio o cal muerta para ajustar el pH de la solución de lixiviación si es necesario. En una realización, el pH está por encima de 10. En otra realización, el pH es 11 o superior.

El proceso de la descripción puede realizarse en una amplia gama de condiciones, tales como pH y Eh. Esto hace que el proceso sea consistente para la lixiviación en pilas o *in situ* e incluso para la lixiviación en tanques.

El lixivante puede incluir además un catalizador de lixiviación. En el caso de lixiviar metales preciosos, el catalizador puede comprender especies cúpricas (de cobre (II)). Las especies cúpricas potencian/aceleran la lixiviación de metales preciosos con aminoácidos. Las especies cúpricas ya pueden estar presentes como minerales de cobre en la mena. Para menas de metales preciosos que ya no contengan cobre, se pueden añadir especies cúpricas para mejorar las velocidades de lixiviación.

El cobre (II) puede usarse (o estar presente) en concentraciones de 1 mM o más. La concentración cúprica puede ser de hasta 10 mM. En una realización, la concentración cúprica es de hasta 5 mM. Las especies cúpricas realizan la función de un catalizador, a diferencia de un oxidante, como en los procesos de lixiviación con tiosulfato. Por consiguiente, las especies cúpricas no se consumen en el presente proceso.

El proceso se puede llevar a cabo a temperatura ambiente o a una temperatura superior a la temperatura ambiente. El proceso puede realizarse eficazmente a temperatura ambiente cuando se usa para recuperar cobre. El proceso puede realizarse a una temperatura elevada cuando se usa para recuperar metales preciosos. Se ha descubierto que una temperatura elevada es particularmente ventajosa cuando el proceso se usa para la recuperación de un metal precioso.

Cuando la temperatura es elevada, la temperatura puede ser un mínimo de 30 °C, tal como al menos 40 °C. La temperatura máxima puede ser el punto de ebullición de la solución. En una realización, el proceso puede realizarse a una temperatura de hasta 75 °C. Se ha descubierto que se obtienen buenos resultados de lixiviación a una temperatura de hasta 60 °C. La solución de lixiviación puede calentarse a la temperatura deseada usando una combinación de, o bien de, intercambio de calor de proceso convencional y calentamiento solar de los licores de proceso.

Cuando el proceso se usa para recuperar tanto cobre como metales preciosos de un material que los contiene, se puede usar un proceso de lixiviación diferencial de varias etapas (p. ej., 2 etapas) que aproveche las diferencias en las respectivas condiciones de recuperación para ambos tipos de metal. Las diferencias en las condiciones de recuperación respectivas pueden comprender diferentes temperaturas y/o la presencia de un oxidante. En una realización de un proceso de lixiviación diferencial de este tipo, el cobre puede lixivarse a temperatura ambiente y los metales preciosos pueden lixivarse a temperatura elevada. En otra realización, el cobre puede lixivarse sin añadir el peróxido de hidrógeno, a continuación los metales preciosos pueden lixivarse después de añadir peróxido de hidrógeno.

En el caso en el que los metales preciosos no estén presentes y la disolución diferencial no sea importante, las temperaturas elevadas pueden mejorar las velocidades de lixiviación de cobre de las menas o concentrados.

El proceso puede incluir construir una pila que comprenda la mena y/o el concentrado, a continuación aplicar el lixivante a la pila. El lixivante puede aplicarse a una pila por goteo, inyección subsuperficial o irrigación por pulverización.

De forma alternativa, el lixivante puede inyectarse en roca previamente granallada a presión para la lixiviación *in situ* o en la explotación, o en cubas, o en tanques agitados. Como se usa en la presente memoria, la lixiviación "*in situ*" se refiere a la lixiviación usando la porosidad natural de la roca. Para la lixiviación "en la explotación", la porosidad se mejora mediante granallado controlado, o craqueo con fluidos u otros medios.

El metal se extrae posteriormente del lixiviado. La extracción puede ser por medio de adsorción tal como por Carbon-In-Pulp (carbono en pulpa - CIP), Carbon-In-Leach (carbono en lixiviación - CIL), Carbon In Column (carbono en columna - CIC), cementación (p. ej., sobre polvo de zinc), o mediante intercambio iónico (Resin-In-Leach [resina en lixiviación - RIL], Resin-In-Pulp [resina en pulpa - RIP] y Resin-In-Column [resina en columna - RIC]). De forma alternativa, el metal puede extraerse mediante extracción con disolvente.

En el caso de extraer metales preciosos, los complejos de metales preciosos se adsorben bien sobre el carbono activado granular. Se pueden aplicar combinaciones de adsorción de lixiviación, tales como carbono en pulpa y carbono en lixiviación a sistemas de aminoácidos simples o mixtos. En el caso de usar el proceso de adsorción, se puede adoptar un proceso de elución de oro adecuado para lograr una alta eficiencia de elución. Los sistemas de

adsorción basados en carbono forman parte de la esfera de experiencia de casi todas las operaciones de minería y procesamiento de oro a base de cianuro, lo que hace que el presente proceso sea compatible con las técnicas de extracción de oro existentes.

5 Los inventores han descubierto que el complejo de aminoácido y metal precioso se carga satisfactoriamente en el carbono activado de los lixiviados con o sin el catalizador de lixiviación. En el caso de recuperación de cobre a partir de la solución, esta puede ocurrir mediante extracción con disolvente o intercambio iónico, seguido de extracción electrolítica,

10 Por tanto, en un primer aspecto, se proporciona un proceso para la recuperación de metal precioso de un material que contiene metales preciosos que incluye las etapas de:

- lixiviar el material que contiene metales preciosos con un lixivante alcalino que contiene un oxidante y un aminoácido o un derivado suyo a una temperatura elevada para producir un lixiviado que contiene metales preciosos; y

15 • extraer los metales preciosos del lixiviado.

En una realización del primer aspecto del proceso, la recuperación de metales preciosos incluye las siguientes etapas:

- el aminoácido se disuelve en una solución acuosa y se añade a una solución o suspensión de lixiviación acuosa;
- se añaden cantidades relevantes de un oxidante u oxidantes (tal como peróxido) a la solución de lixiviación;
- el pH de lixiviación se ajusta en el intervalo entre pH 6 y pH 13, preferiblemente al menos pH 11;
- 25 • la solución de lixiviación se calienta en el intervalo de 30 °C a 100 °C, preferiblemente de 40 °C a 60 °C;
- el tiempo de lixiviación puede estar en el intervalo de 5 días a 30 días o más;

30 Al final del período de lixiviación, se filtra una suspensión de lixiviación o lixiviado y el residuo sólido puede lavarse con filtración varias veces para eliminar cualquier ion metálico disuelto de las colas. El lixiviado se trata con carbono activado para extraer los metales preciosos.

35 En una realización del primer aspecto, se describe un proceso hidrometalúrgico de bajo coste y respetuoso con el medio ambiente para la lixiviación directa de metales preciosos de menas pobres y/o pilas de acopio de desechos de rocas, reduciendo así las leyes de corte económicas para aumentar la proporción de recursos que se puede clasificar como reserva.

40 Las ventajas potenciales del primer aspecto del proceso descrito son la reducción o eliminación de uno o más de los siguientes: (1) coste de molienda, (2) coste de concentración previa, (3) uso de tanques complejos de lixiviación con agitación (en el caso de lixiviación en pilas y lixiviación *in situ*), (4) consumo de energía global (de mina a metal en el caso de la lixiviación en pilas y lixiviación *in situ*), (5) uso de reactivos tóxicos y peligrosos, (6) impacto medioambiental de metales pesados tóxicos movilizados como cianuros Weak Acid Dissociable (disociables en ácido débil - WAD) y (7) huella de carbono, (8) complejidad de procesamiento (en comparación con lixiviantes alternativos) y (9) complejidad química (reduciendo así subproductos no deseados e intermediarios químicos). Otras ventajas incluyen (10) coste bajo del reactivo, (11) potencial para la producción en la explotación (para aminoácidos mixtos por microorganismos), (12) disponibilidad de grandes volúmenes de aminoácidos simples, p. ej., glicina, (13) accesibilidad legal (productos químicos no sometidos a regulación), (14) capacidad para realizar una destrucción biológica dirigida, o (15) para reciclar y reutilizar reactivos, (16) potencial para usar para una variedad de metales preciosos, (17) alta solubilidad de aminoácidos y sus complejos metálicos en agua, permitiendo la intensificación del proceso a tamaños de equipos más pequeños.

50 En un segundo aspecto, se proporciona un proceso para la recuperación de cobre de un material que contiene cobre, que incluye las etapas de:

- lixiviar el material que contiene cobre con un lixivante alcalino que contiene un aminoácido o un derivado suyo para producir un lixiviado que contiene cobre; y
- 55 • extraer el cobre del lixiviado.

60 Se puede usar una realización del segundo aspecto para ejecutar la lixiviación selectiva de cobre a partir de una mena de cobre y metal precioso o un concentrado de mena. Puede usarse para lixiviar selectivamente el cobre de un concentrado de mena de cobre y oro, seguido de la lixiviación de oro (después del lavado opcional del residuo) usando el primer aspecto del proceso a temperatura elevada (40 °C-60 °C), o usando otro proceso de recuperación de oro (p. ej., cianuración). La lixiviación selectiva de cobre reducirá las pérdidas de oro debido a un mecanismo de cementación del oro en presencia de cobre metálico ya que todo el cobre metálico se disolverá en la etapa de lixiviación previa.

65

Una ventaja del segundo aspecto es que puede abordar una exposición persistente en el procesamiento de cobre y cobre-oro, es decir, encontrar un lixiviante apropiado con pocos riesgos medioambientales y de seguridad para las operaciones de lixiviación en pilas, depósitos de desechos, *in situ* y en cubas, que son operaciones de lixiviación lenta abiertas al entorno circundante. De forma alternativa, también puede implementarse en un circuito de counter-current decantation (decantación de corrientes opuestas - CCD), permitiendo un tiempo de permanencia suficiente.

Las ventajas potenciales del segundo aspecto incluyen:

1. El cobre se puede lixiviar selectivamente con respecto al oro en una solución de glicina y peróxido. En una realización, aproximadamente un 98 % de cobre presente en un concentrado de oro y cobre se lixivió en 48 horas en dos etapas.

2. Un 100 % de calcocita, cuprita, cobre metálico y aproximadamente un 80 % de calcopirita pueden disolverse en un lixiviante de glicina-peróxido a temperatura ambiente.

3. La disolución de la ganga, en particular la de hierro (p. ej., derivada de pirita), es mínima en comparación con la lixiviación basada en ácido sulfúrico convencional.

4. Aunque la extracción de cobre aumenta típicamente aumentando las concentraciones de aminoácido y oxidante (p. ej., peróxido, oxígeno o aire), se descubrió que el aminoácido puede lixiviar eficazmente algunos minerales de cobre sin añadir deliberadamente un oxidante.

5. Dado que el proceso de lixiviación se lleva a cabo en una condición de lixiviación alcalina, el residuo final se puede lixiviar directamente mediante el proceso de cianuración, si es necesario o preferido.

6. La fracción soluble en cianuro de los minerales de cobre se ha reducido significativamente, teniendo así un gran impacto en el consumo de cianuro aguas abajo durante la posterior lixiviación del oro. La lixiviación alcalina de los minerales de cobre implica también que no se requiere un margen en el pH (como para una lixiviación ácida convencional) que aumentaría los requisitos cáusticos aguas abajo.

7. El sistema de aminoácidos alcalinos es particularmente adecuado para depósitos de cobre con una proporción significativa de minerales que consumen ácidos tales como calcita, trona, dolomita u otros minerales basados en carbonato, lo que a menudo impide los procesos de extracción ácida convencionales.

Otras ventajas del segundo aspecto son similares a las del primer aspecto, especialmente, reducción o eliminación de uno o más de los siguientes: (1) coste de molienda, (2) coste de concentración previa, (3) uso de tanques complejos de lixiviación con agitación (en el caso de lixiviación en pilas y lixiviación *in situ*), (4) consumo de energía global (de mina a metal en el caso de la lixiviación en pilas y lixiviación *in situ*), (5) uso de reactivos tóxicos y peligrosos, (6) impacto medioambiental de metales pesados tóxicos movilizados como cianuros Weak Acid Dissociable (disociables en ácido débil - WAD) y (7) huella de carbono, (8) complejidad de procesamiento (en comparación con lixiviantes alternativos) y (9) complejidad química (reduciendo así subproductos no deseados e intermediarios químicos). Otras ventajas incluyen (10) coste bajo del reactivo, (11) potencial para la producción en la explotación (para aminoácidos mixtos por microorganismos), (12) disponibilidad de grandes volúmenes de aminoácidos simples, p. ej., glicina, (13) accesibilidad legal (productos químicos no sometidos a regulación), (14) capacidad para realizar una destrucción biológica dirigida, o (15) para reciclar y reutilizar reactivos, (16) alta solubilidad de aminoácidos y sus complejos metálicos en agua, permitiendo la intensificación del proceso a tamaños de equipos más pequeños.

En un tercer aspecto, se proporciona un proceso de lixiviación diferencial para la recuperación de cobre y metales preciosos de un material que contiene cobre y metales preciosos que incluye las etapas de:

- lixiviar el material que contiene cobre y metales preciosos con un lixiviante alcalino que contiene un aminoácido o un derivado suyo en las primeras condiciones para producir un lixiviado que contiene cobre y un residuo que contiene metales preciosos;

- lixiviar el residuo que contiene metales preciosos con un lixiviante alcalino que contiene un aminoácido o un derivado suyo en segundas condiciones para producir un lixiviado que contiene metales preciosos;

- extraer el cobre del lixiviado que contiene cobre; y

- extraer los metales preciosos del lixiviado que contiene metales preciosos.

Las condiciones primera y segunda pueden implicar diferencias en las respectivas condiciones de recuperación. Esas diferencias pueden comprender diferentes temperaturas y/o la presencia o ausencia de un oxidante. En una realización de un proceso de lixiviación diferencial de este tipo, el cobre puede lixivarse a temperatura ambiente y los metales preciosos pueden lixivarse a temperatura elevada. En otra realización, el cobre puede lixivarse sin añadir el peróxido

de hidrógeno (pero con aireación), a continuación los metales preciosos pueden lixivarse después de añadir peróxido de hidrógeno.

Breve descripción de los dibujos

A pesar de cualquier otra forma que pueda estar dentro del alcance del aparato y método como se indica en la Breve descripción de la invención, a continuación se describirán realizaciones específicas, solo a modo de ejemplo, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

Figura 1 es un gráfico que muestra las concentraciones de oro en una solución de lixiviación a diferentes tiempos de lixiviación (pH 10, temperatura 60 °C, un 1 % de peróxido y 1 M de glicina).

Figura 2 es un gráfico que muestra una disolución de oro en soluciones que contienen diferentes concentraciones de glicina y un 1 % de peróxido de hidrógeno a pH 10 y una temperatura de 60 °C.

Figura 3 es un trazado de $\text{Log } (\Delta[\text{Au}]/[\text{Au}]_s)$ frente a $\text{Log } t$ para la solución madre después de la lixiviación durante 15 días (tiempo de carga 4 horas, carbono 1,466 g/L).

Figura 4 es un gráfico que muestra el efecto del tipo de aminoácidos en una disolución de oro: 0,05 M de aminoácido, 1 % de H_2O_2 , pH 11, a 60 °C.

Figura 5 es un gráfico que muestra el efecto de la mezcla de aminoácidos en una disolución de oro: 0,1 M de aminoácido, 1 % de H_2O_2 , pH 11, a 60 °C.

Figura 6 es un gráfico que muestra el trazado de $\text{Log } (\Delta[\text{Au}]/[\text{Au}]_s)$ frente a $\text{Log } t$ para la solución madre después de la lixiviación (tiempo de carga 23 horas, carbono 1,55 g/L).

Figura 7 es un gráfico que muestra el efecto de la plata en una disolución de oro: 1 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH 10, 60 °C.

Figura 8 es un gráfico que muestra el efecto de la temperatura en una disolución de oro: 1 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH 10, a diferentes temperaturas.

Figura 9 es un gráfico que muestra el efecto de la temperatura en una disolución de oro: 0,1 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH inicial 11,5, a diferentes temperaturas.

Figura 10 es un gráfico que muestra el efecto de la temperatura en la velocidad de una disolución de oro a lo largo del tiempo de lixiviación: 0,1 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH inicial 11,5, a diferentes temperaturas.

Figura 11 es un gráfico que muestra el efecto de la concentración de peróxido de hidrógeno en el E_h medido de la solución de lixiviación: 0,1 M de glicina, diferentes porcentajes de H_2O_2 , pH 11,5, 60 °C.

Figura 12 es un gráfico que muestra el efecto de la concentración de peróxido de hidrógeno en una disolución de oro: 0,1 M de glicina, diferentes porcentajes de H_2O_2 , pH 11,5, 60 °C.

Figura 13 es un gráfico que muestra el efecto del pH de la solución de lixiviación en una disolución de oro: 0,5 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH, a 60 °C.

Figura 14 es un gráfico que muestra el efecto del pH de la solución de lixiviación en una disolución de oro: 0,1 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH, a 60 °C.

Figura 15 es un gráfico que muestra el efecto de iones de Cu^{2+} en una disolución de oro: 0,1 M de glicina, 0,1 % de H_2O_2 , pH 11, a 30 °C.

Figura 16 es un gráfico que muestra el efecto de iones de Cu^{2+} en una disolución de oro: 0,1 M de glicina, 0,3 % de H_2O_2 , 4 mM de Cu^{2+} , pH 11,9 y 30 °C.

Figura 17 es un gráfico que muestra el efecto de la disolución de la pirita en una disolución de oro a partir de soluciones de glicina y peróxido: 0,1 M de aminoácido, 1 % de H_2O_2 , pH 11, a 60 °C.

Figura 18 es un gráfico que muestra disoluciones de oro en soluciones estériles recicladas que contienen inicialmente 1 M de glicina y 1 % de peróxido a 60 °C y pH 10.

Figura 19 es un gráfico que muestra disoluciones de oro en soluciones recién preparadas y envejecidas que contienen inicialmente 1 M de glicina y 1 % de peróxido a 60 °C y pH 10.

Figura 20 es un gráfico que muestra las velocidades de lixiviación de oro en soluciones que contienen 1 M de glicina y 1 % de peróxido a 60 °C y pH 10.

Figura 21 es un gráfico que muestra la concentración de oro en una solución que contiene 1 M de glicina, 1 % de peróxido, 5 mM de Cu(II) a 40 °C y pH 10.

Figura 22 es un gráfico que muestra la velocidad de lixiviación de oro en una solución que contiene 1 M de glicina, 1 % de peróxido, 5 mM de Cu(II) a 40 °C y pH 10.

Figura 23 es un gráfico de $\text{Log } (\Delta[\text{Au}]/[\text{Au}]_s)$ frente a $\text{Log } t$ para la solución madre después de la lixiviación durante 15 días (tiempo de carga 4 horas, carbono 1,466 g/L).

Figura 24 es un gráfico que muestra el % en masa de minerales de cobre en un concentrado de cobre antes y después de la lixiviación en soluciones de glicina (condiciones de la lixiviación: dos etapas, 0,3 M de glicina, 1 % de peróxido, temperatura ambiente, pH 11, 48 horas).

Figura 25 es un diagrama esquemático para el proceso de lixiviación de cobre a contracorriente en dos etapas.

Figura 26 es un gráfico que muestra la extracción de cobre (%) frente al tiempo de lixiviación (horas) del concentrado de Cu-Au después de la lixiviación en dos etapas.

Figura 27 es un gráfico que muestra el % en masa de minerales de cobre en un concentrado de cobre antes y después de la lixiviación en soluciones de glicina (condiciones de la lixiviación: una etapa, 0,4 M de glicina, 1 % de peróxido, temperatura ambiente, pH 11,5, 96 horas).

Figura 28 es un gráfico que muestra la extracción de cobre (%) frente al tiempo de lixiviación (horas) a diferentes pH de soluciones (0,3 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , temperatura ambiente).

Figura 29 es un gráfico que muestra la extracción de cobre (%) frente al tiempo de lixiviación (horas) con diferentes concentraciones de peróxido (0,3 M de glicina, pH 11, temperatura ambiente, densidad de pulpa al 10 %).

Figura 30 es un gráfico que muestra la extracción de cobre (%) frente al tiempo de lixiviación (horas) a diferentes densidades de pulpa (0,3 M de glicina, 1 % de H_2O_2 , pH 11, temperatura ambiente).

Figura 31 es un gráfico que muestra la extracción de cobre (%) frente al tiempo de lixiviación (horas) con diferentes concentraciones de glicina (1 % de H_2O_2 , pH 11, temperatura ambiente, densidad de pulpa al 10 %).

Ejemplos

A continuación se describirán ejemplos no limitantes de un proceso para la recuperación de cobre o metales preciosos de un material que contiene cobre y/o metales preciosos.

Ejemplos 1 a 15: Recuperación de metales preciosos

Todos los Ejemplos 1 a 15 se llevaron a cabo usando soluciones preparadas a partir de reactivos de pureza analítica o sintetizados y agua Millipore. A menos que se especifique, todos los ejemplos se realizaron usando agitadores magnéticos y barras de agitadores magnéticos revestidas de teflón. Se añadió oro y/o plata a una solución de aminoácido y peróxido en un vaso de precipitado y se calentó a la temperatura requerida mientras se agitaba. Se hicieron láminas de oro y oro-plata usadas en todos los ejemplos de oro y plata con una pureza del 99,99 %. Antes de cada experimento, la superficie de cada lámina se pulió con papel de carburo de silicio Struers impermeable (FEPA P#2400). Finalmente, la lámina de oro se lavó con agua destilada y se dejó secar.

Para probar la actividad del carbono para adsorber un complejo de oro y glicina, a menos que se especifique, se añadió 1,5 g/L de carbono recién preparado (-2,36+2 mm) a las soluciones madres después de la lixiviación. Los experimentos de adsorción se han realizado a temperatura ambiente con una velocidad de rotación de 150 rpm. Para evaluar la adsorción de oro en carbono, se tomaron submuestras a intervalos de tiempo diferentes y a continuación se diluyeron con cianuro de sodio acuoso antes de analizarse mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES).

Ejemplo 1.

En el Ejemplo 1, se usó una solución que contenía 1 M del aminoácido: glicina y 1 % del oxidante, peróxido de hidrógeno para disolver oro metálico puro (como alambre de oro y láminas de oro) a una temperatura de 60 °C. La Figura 1 muestra la cantidad de oro disuelto en una solución (400 ml) que contenía 1 M de glicina y 1 % de peróxido a lo largo del tiempo de lixiviación. Puede observarse que el oro se disuelve en estas condiciones en cantidades razonables de hasta 18 mg/l en 280 horas. En este ejemplo, también se demostró que las concentraciones más bajas

de reactivos (0,1-0,4 M de glicina), temperatura más baja (es decir, 40 °C) y pH natural de la solución (aproximadamente pH 6) eran efectivas.

Ejemplo 2: Efecto de la concentración de glicina

Se estudió la cinética de la disolución de oro en soluciones que contenían diferentes concentraciones de glicina y 1 % de peróxido de hidrógeno a pH 10 y temperatura de 60 °C y los resultados se representan en la Figura 2. Puede observarse a partir de los resultados mostrados en la Figura 2 que, en las condiciones de este ejemplo, la disolución del oro aumenta al aumentar la concentración de glicina hasta 1 M. La Tabla 1 muestra la velocidad de lixiviación de oro con diferentes concentraciones de glicina.

Tabla 1. Velocidad de lixiviación de oro con diferentes concentraciones de glicina: Glicina, 1 % de H₂O₂, pH 10, 60 °C.

Glicina, M	Au, 10 ³ × μmol/m ² .s
0,30	11,3
0,50	16,9
1,00	31,3

La velocidad de lixiviación de oro en el sistema de glicina-peróxido como se muestra en la Tabla 1 puede ser significativamente mayor que las velocidades con el uso de tiosulfato-oxalato férrico y sistemas de EDTA férrico sin tiourea.

Ejemplo 3: Adsorción de un complejo de oro y glicinato en carbono

Una de las consideraciones para una alternativa a la lixiviación de oro basada en cianuro es la fuerza de adsorción del oro lixiviado en carbono activado. Por lo tanto, es apropiado examinar la capacidad del carbono activado para adsorber el complejo de oro y glicina de la solución de lixiviación particularmente desde la perspectiva de una aplicación industrial.

Después de algunos de los experimentos de lixiviación cinética, se añadieron diferentes cantidades de carbono recién preparado a las soluciones madre de lixiviación. Se tomaron submuestras de diferentes pruebas de adsorción a diferentes intervalos y se analizaron mediante ICP-OES. La cinética de la adsorción de oro y plata sobre carbono activado se ha evaluado mediante la determinación de la constante de actividad del carbono usando la Ecuación (1):

$$\log (\Delta [Au \text{ o } Ag]_c / [Au \text{ o } Ag]_s) = n \log t + \log k \quad (1)$$

$\Delta [Au \text{ o } Ag]_c$ = cambio en $[Au \text{ o } Ag]$ en carbono de $t=0$ a $t=t$ horas; $[Au \text{ o } Ag]_s = [Au \text{ o } Ag]$ en solución a $t = t$ horas; n = una constante derivada experimentalmente para la pendiente de la ecuación anterior; y k = una constante de velocidad empírica en $t = 1$ hora;

El oro y la plata adsorbidos en carbono y las cantidades de metales en soluciones se han calculado y presentado en las Tablas 2, 3 y 4.

La Figura 3 también muestra el trazado de $\log (\Delta [Au]_c / [Au]_s)$ frente a $(\log t)$ para los datos mostrados en la Tabla 3. Los experimentos de adsorción mostraron que el complejo de oro y glicina usando el proceso de la descripción se adsorbe sobre el carbono activado a una velocidad similar o incluso mayor que el complejo de cianuro y oro.

También puede observarse a partir de los datos mostrados en las Tablas 3 y 4 que el complejo de plata y glicinato se adsorbe peor en el carbono activado y la presencia de plata mejora la carga de oro en carbono.

Tabla 2 Adsorción de oro en carbono activado desde la solución madre después de la lixiviación durante 456 horas (volumen de la solución 350 ml).

Tiempo (min)	Tiempo (h)	[Au] (mg/l)	$\Delta [Au]_s$	$\Delta [Au]_c$	$[Au]_c/[Au]_s$	Log t	$\log(\Delta [Au]_c/[Au]_s)$
0	0,00	15,5					
30	0,50	11,6	3,882	2649	229	0,301	2,359
60	1,00	9,96	5,504	3701	372	0,000	2,570
120	2,00	8,14	7,321	4852	596	0,301	2,775
240	4,00	6,47	8,993	5872	908	0,602	2,958

Tabla 3 Adsorción de oro en carbono activado desde la solución madre después de la lixiviación de una aleación de oro/plata durante 168 horas (volumen de la solución 380 ml).

Tiempo (min)	Tiempo (h)	[Au] (mg/l)	$\Delta[Au]_s$	$\Delta[Au]_c$	$[Au]_c/[Au]_s$	log t	Log($\Delta[Au]_c/[Au]_s$)
0	0,00	38,70					
30	0,50	24,60	14,097	6565	267	-0,301	2,426
96	1,60	15,82	22,882	10656	674	0,204	2,828
180	3,00	12,08	26,616	12395	1026	0,477	3,011
240	4,00	10,26	28,435	13242	1290	0,602	3,111

Tabla 4 Adsorción de plata en carbono activado desde la solución madre después de la lixiviación de una aleación de oro/plata durante 168 horas (volumen de la solución 380 ml).

Tiempo (min)	Tiempo (h)	[Ag] (mg/l)	$\Delta[Ag]_s$	$\Delta[Ag]_c$	$[Ag]_c/[Au]_s$	Log t	log($\Delta[Ag]_c/[Au]_s$)
0	0,00	56,1					
30	0,50	48,1	8,079	3683	77	-0,301	1,884
96	1,60	42,7	13,412	6114	143	0,204	2,156
180	3,00	39,1	17,028	7763	198	0,477	2,298
240	4,00	37,0	19,108	8711	235	0,602	2,371

Ejemplo 4: Efecto del tipo de aminoácidos

Se han usado aminoácidos de glicina, histidina y alanina para probar el efecto del tipo de aminoácido en las disoluciones de oro. Los experimentos se han llevado a cabo en 0,05 M de aminoácidos a pH 11 y 60 °C de temperatura. La Figura 4 muestra la disolución de oro en diferentes sistemas de aminoácidos. Puede observarse que la disolución inicial de oro en la solución de histidina es más rápida que las soluciones de glicina y alanina, sin embargo, prolongando la lixiviación, se descubrió que la glicina disuelve el oro más rápidamente y en mayor medida que la histidina y la alanina.

Para evaluar el efecto de las mezclas de aminoácidos, se estimó una mezcla de 0,05 M de glicina y 0,05 M de histidina, un 1 % de H₂O₂, a pH 11,5 y 60 °C. La Figura 5 muestra los efectos de usar una combinación de soluciones de glicina-histidina y solo glicina en la disolución del oro. Es evidente que el uso de una mezcla de glicina e histidina disuelve más el oro que el uso de solo glicina.

La cinética de la adsorción de oro sobre carbono activado de las soluciones de glicina-histidina se ha evaluado mediante la determinación de la constante de actividad del carbono usando la Ecuación (2). En la Tabla 5 se han calculado y presentado el oro adsorbido en carbono y las cantidades de metales en las soluciones.

$$\frac{\log(\Delta[Au \text{ o } Ag]_c)}{[Au \text{ o } Ag]_s} = n \log t + \log k \quad (2)$$

$\Delta[Au \text{ o } Ag]_c$ = cambio en Au o Ag en carbono de t = 0 a t=t horas; $[Au \text{ o } Ag]_s$ = Au o Ag en solución a t = t horas; n = una constante derivada experimentalmente para la pendiente de la ecuación anterior; y k = una constante de velocidad empírica en t = 1 hora.

La Figura 6 también muestra la gráfica de Log ($\Delta[Au]_c/[Au]_s$) frente a (Log t) para los datos mostrados en la Tabla 5. El experimento de adsorción muestra que el oro de la solución que contiene glicina-histidina se adsorbe sobre el carbono activado. La constante de actividad del carbono calculada fue de 188 y la carga de oro fue de 5,5 kg de Au/ton de carbono. A partir de los datos mostrados en la Tabla 5 y la Figura 6, puede observarse que el oro puede cargarse sobre carbono de soluciones que contienen una mezcla de solución de glicina e histidina.

Tabla 5 Adsorción de oro en carbono activado desde soluciones de glicina e histidina.

Tiempo (min)	Tiempo (h)	[Au] (mg/l)	$\Delta[Au]_s$	$\Delta[Au]_c$	$[Au]_c/[Au]_s$	Log t	Log($\Delta[Au]_c/[Au]_s$)
0	0	24,084	0,000	0	0		
30	0,5	19,143	4,941	2471	129	-0,301	2,111
80	1,33	16,656	7,428	3714	223	0,124	2,348
150	2,5	15,03	9,054	4527	301	0,398	2,479
270	4,5	13,173	10,911	5456	414	0,653	2,617
1380	23	8,34	15,744	7872	944	1,362	2,975

Ejemplo 5: Efecto de la plata

Para estudiar el efecto de la plata en la disolución de oro, se han lixiviado láminas (área de superficie de 20 cm²) de oro puro y un 50 % de oro y un 50 % de plata en las soluciones que contenían glicina y peróxido. En la Figura 7 se muestra una disolución de oro y plata a partir de oro puro y una aleación de oro y plata. Puede observarse que la presencia de plata mejora la disolución del oro y la plata se disuelve más rápidamente que el oro en solución de glicina.

La Tabla 6 muestra la velocidad de lixiviación del oro y la plata después de 168 horas a partir de oro puro y un 50 % de oro y un 50 % de plata. Puede observarse que la velocidad de lixiviación del oro de la aleación de oro y plata es aproximadamente 6 veces mayor que la velocidad del oro puro. La velocidad de lixiviación de la plata es mayor que la del oro en soluciones de glicina y peróxido.

Tabla 6. Velocidades de lixiviación de oro y plata a partir de oro puro y una aleación de oro y plata; Glicina, 1 % de H₂O₂, pH 10, 60 °C.

Fuente de Au, Ag	Au, 10 ³ × μmol/m ² .s
Oro (de lámina de oro puro)	31,3
Oro (de un 50 % de Au y un 50 % de Ag)	185
Plata (de un 50 % de Au y un 50 % de Ag)	247

Ejemplo 6: Efecto de la temperatura

En las Figuras 8, 9 y 10 se muestra el efecto de la temperatura sobre la disolución de oro.

La Figura 8 muestra el efecto de la temperatura sobre la cinética de la lixiviación de oro en una solución que contiene 1 M de glicina, 1 % de H₂O₂, a pH 10. Puede observarse que la disolución del oro aumenta drásticamente a medida que aumenta la temperatura de 23 °C a 60 °C.

La Figura 9 muestra el efecto de la temperatura sobre la cinética de la lixiviación de oro con una concentración de 0,1 M de glicina a temperaturas de 23 °C, 30 °C, 40 °C, 60 °C y 75 °C. Claramente, puede observarse que la disolución del oro aumenta drásticamente a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, se descubrió que a alta temperatura (75 °C) la disolución inicial del oro es más rápida, pero la velocidad de lixiviación del oro disminuye rápidamente.

La lixiviación de oro es un proceso químicamente controlado en el que la temperatura afecta principalmente a la velocidad de reacción. Los resultados más interesantes mostraron, en la Figura 9, que después de 264 h de lixiviación a temperatura ambiente, la velocidad de disolución del oro aumentó drásticamente una vez que la temperatura se había elevado a 60 °C.

La Figura 10 ilustra las velocidades de disolución de oro a lo largo del tiempo de lixiviación a diferentes temperaturas. Puede observarse que, a temperatura elevada, la velocidad de lixiviación del oro aumenta inicialmente y a continuación comienza a disminuir, prolongándose el tiempo de lixiviación. La velocidad media de disolución del oro después de seis días de lixiviación a 75 °C fue de $39 \times 10^{-3} \mu\text{mol/m}^2.\text{s}$, que es mayor que la velocidad de lixiviación del oro de $2 \times 10^{-3} \mu\text{mol/m}^2.\text{s}$ de un sistema férrico con tiosulfato y sin tiourea.

Ejemplo 7: Efecto del peróxido

Se ha monitorizado el pH y el E_h de la solución a lo largo del tiempo usando un medidor de 90-FLMV. La Figura 11 muestra los perfiles de E_h de las soluciones de glicina y peróxido de hidrógeno a lo largo del tiempo en diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno. A partir de los resultados mostrados en la Figura 12 se observa claramente que el peróxido de hidrógeno mejoró significativamente la disolución del oro. Un mínimo de 0,1 % de peróxido dio como resultado una disolución de oro, y el aumento de la concentración de peróxido de hidrógeno hasta un 2 % de peróxido mejoró significativamente la disolución del oro.

Ejemplo 8: Efecto del pH

En las Figuras 13 y 14 se muestra el efecto del pH (añadiendo iones de hidróxido) en la disolución de oro. Puede observarse que el sistema de glicina y peróxido es muy sensible al pH de la lixiviación y los iones de hidróxido, y puede observarse que la disolución del oro aumenta significativamente aumentando el pH de la lixiviación por encima de pH = 10.

La Figura 13 muestra el efecto del pH sobre la velocidad de lixiviación de oro en soluciones que contienen 0,5 M de glicina y 1 % de peróxido a una temperatura de lixiviación de 60 °C. Después de solo 24 horas de lixiviación a pH 11, la velocidad de lixiviación del oro era de $0,35 \mu\text{mol/m}^2.\text{s}$. Esta velocidad de lixiviación es mayor que la velocidad de lixiviación del oro ($0,22\text{-}0,25 \mu\text{mol/m}^2.\text{s}$) de 100 mM de soluciones de tiosulfato en presencia de oxidante férrico y tiourea. La Tabla 7 muestra la velocidad de lixiviación de oro después de diferentes lixivaciones a pH 5,8, 10 y 11.

Los datos muestran que la velocidad de lixiviación del oro a pH 11 es 30 veces mayor que la velocidad a pH 10 después de 48 horas. Sin embargo, se descubrió que la velocidad de lixiviación disminuye aumentando el tiempo de lixiviación a pH 11. La velocidad de lixiviación inicial del oro a pH natural de una solución (pH ~5,8) fue más rápida que la lixiviación a pH y disminuyó, prolongándose el tiempo de lixiviación.

Tabla 7. Velocidad de lixiviación de oro a diferente pH de lixiviación: 0,5 M de glicina, 1 % de H₂O₂, pH, 60 °C.

Tiempo de lixiviación, h	Au, 10 ³ × μmol/m ² .s		
	pH 5,8	pH 10	pH 11
24	8,11	0,59	352
29	8,75	1,30	367
48	5,13	11,47	322
119	4,19	14,34	174
167	3,02	16,93	142

En la Figura 14 se muestra el efecto de aumentar los iones de hidróxido, por tanto, el pH de las soluciones, en la disolución del oro para una solución que contiene 0,1 M de glicina, 1 % de H₂O₂, a 60 °C. Nuevamente, se descubrió que la disolución del oro en las soluciones de glicina y peróxido es muy sensible al pH de lixiviación y a los iones de hidróxido. La disolución de oro aumenta significativamente aumentando el pH de lixiviación hasta una alcalinidad más alta.

La velocidad de lixiviación de oro se mejora a un pH superior a 10, preferiblemente superior a 11, en soluciones que contienen 0,1 M de glicina y 1 % de peróxido a una temperatura de lixiviación de 60 °C.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 14, puede observarse que añadir algo más de peróxido al sistema mejora la disolución del oro. La Tabla 8 muestra las cantidades requeridas de cáustico en mM para alcanzar el pH objetivo.

Tabla 8. NaOH requerido para lograr el pH objetivo de la solución de lixiviación.

pH de lixiviación	NaOH requerido (mM)
6,10	0
10,10	47,5
11,50	125,0
12,00	175,0
12,80	293,0

Ejemplo 9: Efecto de Cu²⁺

Se ha descubierto que añadir Cu²⁺ al sistema de glicina y peróxido mejora la disolución del oro. La Figura 15 muestra cómo la presencia de iones de Cu²⁺ mejora la disolución del oro en el sistema de glicina y peróxido, en una solución que contiene 0,1 M de glicina, 1 % de H₂O₂, pH 11 a 30 °C.

Se ha realizado una prueba adicional para estudiar el efecto de los iones de Cu²⁺ en el sistema de glicina y peróxido de disolución de oro aumentando el pH de lixiviación a 11,9 y una concentración de peróxido al 0,3 %. En la Figura 16 se muestran las cantidades de oro disuelto con este sistema frente a la lixiviación. Una comparación entre los resultados de la Figura 15 en presencia de Cu²⁺ y la Figura 16 indica que el aumento del pH y el peróxido mejoran la disolución del oro. La solución de oro y glicina en presencia de iones de Cu²⁺ se ha cargado con éxito sobre carbono activado.

Ejemplo 10: Efecto de la pirita

Los cuerpos de mena de oro pueden contener diferentes minerales de pirita de diferente reactividad; uno de los minerales más reactivos asociados al oro es la pirita. Para estudiar el efecto de la pirita, se añadieron diferentes cantidades de minerales de pirita a la solución de lixiviación antes de añadir la lámina de oro. La Figura 17 muestra el efecto de la pirita en una disolución de oro en soluciones que contienen pirita (FeS₂). Es evidente que la disolución del oro en presencia de pirita es menor que la medida sin pirita. La disminución en la disolución del oro puede atribuirse al consumo de peróxido para oxidar la pirita, o a la descomposición catalítica en la superficie de la pirita.

Ejemplo 11: Actividad de una solución reciclada

Las pruebas de lixiviación se realizaron utilizando una solución estéril reciclada después de la adsorción de oro y plata. Se usó una solución estéril reciclada una o dos veces para lixiviar una lámina de oro puro de 1 cm de ancho y 10 cm

de longitud. En la Figura 18 se muestran los resultados de estas pruebas. Puede observarse que la solución de lixiviación reciclada lixivia oro muy eficazmente a lo largo del tiempo. Los resultados mostrados en la Figura 18 ilustran que el lixiviante y el proceso son consistentes en términos de estabilidad del reactivo a lo largo del tiempo.

5 Ejemplo 12: Efecto del envejecimiento de la solución

Se dejó una solución de 1 M de glicina y 1 % de peróxido 4 días a temperatura ambiente. Después del envejecimiento, se añadió oro a la solución envejecida y se tomaron muestras frecuentemente para analizar el oro mediante ICP-OES. En la Figura 19 se muestran los resultados de la lixiviación del oro en soluciones recién preparadas y envejecidas.

Los resultados ilustran que el oro se disuelve más rápidamente con una mayor velocidad de lixiviación en la solución envejecida que en la solución recién preparada. La velocidad de lixiviación del oro en una solución envejecida y en soluciones recién preparadas después de 215 horas era de 0,045 y 0,032 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ respectivamente. La Figura 20 muestra la velocidad de lixiviación del oro durante la lixiviación de 264 horas en una solución que contenía 1 M de glicina y 1 % de peróxido. Es interesante observar que la velocidad de lixiviación del oro aumenta a lo largo del tiempo de lixiviación.

Ejemplo 13: pH y Eh a lo largo del tiempo

El potencial electroquímico (Eh) y el pH de la solución de lixiviación se midieron durante 19 días de lixiviación. La Tabla 9 muestra los valores de pH y Eh a lo largo del tiempo durante 456 horas de lixiviación. Puede observarse que el pH y el Eh son razonablemente estables a lo largo de este tiempo, lo que indica nuevamente la estabilidad del reactivo.

Tabla 9 pH y Eh a lo largo del tiempo de lixiviación en soluciones que contienen 1 M de glicina y 1 % de peróxido a 60 °C.

Tiempo, h	pH	Eh(mV)
3	9,3	-128
23	9,3	-117
48	9,25	-112
167	9,21	-117
215	9,24	-118
287	9,19	-115
384	9,18	-121
456	9,21	-115

Ejemplo 14: Tiempo de lixiviación prolongado a 40 °C.

En este experimento, se ha usado una solución que contenía 1 M de glicina, 1 % de peróxido de hidrógeno y 5 mM de Cu(II) a una temperatura de 40 °C. En este ejemplo se ha usado oro metálico puro como lámina de oro de 36 cm² de área de superficie. La Figura 21 muestra la cantidad de oro disuelto en una solución (400 ml) que contiene 1 M de glicina, 1 % de peróxido de hidrógeno y 5 mM de Cu(II). Puede observarse que el oro también se disuelve en esta condición en cantidades razonables.

Los resultados más interesantes de este ejemplo son que la velocidad de lixiviación del oro aumenta a lo largo del tiempo (la mayoría de los procesos alternativos de lixiviación de oro mostraron una velocidad decreciente de la lixiviación del oro a lo largo del tiempo). Estos resultados reflejan la estabilidad consistente de los reactivos en la solución de lixiviación. Se dejó que el experimento continuara durante aproximadamente 14 días (334 horas). La Figura 21 muestra la cantidad de oro disuelto en una solución de lixiviación a lo largo del tiempo y la Figura 22 muestra la velocidad de lixiviación de oro en $\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{día}$ durante todo el período de lixiviación. En este sistema consistente, el pH de la solución no cambió a lo largo de los 14 días del tiempo de lixiviación y el Eh fluctuaba entre -50 mV y -40 mV.

Ejemplo 15: Adsorción de oro en carbono activado

Se añadieron diferentes cantidades de carbono activado a las soluciones madre de lixiviación de los Ejemplos 12 y 13. A intervalos se tomaron muestras de diferentes pruebas de adsorción y se analizaron mediante ICP-OES. En las Tablas 10, 11 y 12 se han calculado y presentado el oro adsorbido en carbono y las cantidades de oro en las soluciones.

La cinética de la adsorción de oro y plata sobre carbono activado también se ha evaluado mediante la determinación de la constante de actividad del carbono usando la siguiente ecuación (3):

$$\log (\Delta [\text{Au o Ag}]_c / [\text{Au o Ag}]_s) = n \log t + \log k \quad (3)$$

Donde:

$\Delta[\text{Au o Ag}]_c$ = cambio en $[\text{Au o Ag}]$ en carbono de $t=0$ a $t=t$ horas

$[\text{Au o Ag}]_s$ = $[\text{Au o Ag}]$ en solución a $t = t$ horas

5 n = una constante derivada experimentalmente para la pendiente de la ecuación anterior.

k = una constante de velocidad empírica a $t=1$ hora

10 r^2 = el coeficiente de correlación de la ecuación anterior

Como ejemplo para mostrar la actividad de adsorción del oro sobre carbono, la Figura 23 muestra el trazado de $\text{Log } (\Delta[\text{Au}]_c / [\text{Au}]_s)$ frente a $(\text{Log } t)$ para los datos mostrados en la Tabla 10.

Los diferentes experimentos de adsorción indican que el oro lixiviado usando el proceso de la descripción podría adsorberse sobre carbono activado a una velocidad similar a los complejos de cianuro de oro.

También puede observarse a partir de los datos mostrados en las Tablas 11 y 12 que la plata se adsorbe ligeramente en el carbono activado y la presencia de plata mejora la carga de oro en carbono.

Tabla 10 Adsorción de oro en carbono activado de una solución madre después de la lixiviación durante 456 horas (volumen de la solución 350 ml).

Peso en seco del carbono		0,513 g		Carga (4 horas) = 6,2 Kg/t			
Tiempo min	Tiempo (h)	[Au] mg/l	$\Delta[\text{Au}]_s$	$\Delta[\text{Au}]_c$	$[\text{Au}]_c/[\text{Au}]_s$	Log t	log $[\text{Au}]_c/[\text{Au}]_s$
0	0,0	15,5	0,000	0	0		
30	0,5	11,6	3,882	2649	229	-0,301	2,359
60	1,0	9,96	5,504	3701	372	0,000	2,570
120	2,0	8,14	7,321	4852	596	0,301	2,775
240	4,0	6,47	8,993	5872	908	0,602	2,958

Tabla 11 Adsorción de oro en carbono activado desde la solución madre después de la lixiviación de aleaciones de oro/plata durante 168 horas (volumen de la solución 380 ml).

Peso en seco del carbono		0,816 g		Carga (4 horas) = 10,5 Kg/t			
Tiempo (min)	Tiempo (h)	[Au] mg/l	$\Delta[\text{Au}]_s$	$\Delta[\text{Au}]_c$	$[\text{Au}]_c/[\text{Au}]_s$	Log t	log $[\text{Au}]_c/[\text{Au}]_s$
0	0,00	32,54	0,000	0	0		
30	0,50	24,33	8,210	3823	157	-0,301	2,196
96	1,60	15,87	16,670	7763	489	0,204	2,689
180	3,00	11,55	20,990	9775	846	0,477	2,928
240	4,00	9,78	22,760	10599	1084	0,602	3,035

Tabla 12 Adsorción de plata en carbono activado desde la solución madre después de la lixiviación de aleaciones de oro/plata durante 168 horas (volumen de la solución 380 ml).

Peso en seco del carbono		0,816 g		Carga (4 horas) = 1,54 Kg/t			
Tiempo (min)	Tiempo (h)	[Ag] mg/l	$\Delta[\text{Ag}]_s$	$\Delta[\text{Ag}]_c$	$[\text{Ag}]_c/[\text{Ag}]_s$	Log t	log $[\text{Ag}]_c/[\text{Ag}]_s$
0	0,00	59,51	0,000	0	0		
30	0,50	56,32	3,190	1454	26	-0,301	1,412
96	1,60	54,33	5,180	2361	43	0,204	1,638
180	3,00	52,43	7,080	3228	62	0,477	1,789
240	4,00	51,59	7,920	3611	70	0,602	1,845

Ejemplos 16 a 21: Recuperación de cobre

Los siguientes Ejemplos 16 a 21 detallan la recuperación de cobre de un concentrado por gravedad de cobre y oro. Sin embargo, debe entenderse que el proceso de la presente descripción no se limita a la recuperación de cobre de concentrados de cobre y oro, sino que también puede aplicarse a la recuperación de cobre de otros materiales que contengan cobre, tales como concentrados de menas de cobre que no contengan oro.

Se produjo un concentrado por gravedad de cobre y oro alimentando un ciclón con descarga del hundido en un separador por gravedad centrífuga por cargas en una planta de cobre y oro en Australia occidental. El concentrado por gravedad concentró convenientemente muchos minerales no sulfurosos de cobre y cobre nativo, así como minerales sulfurosos, con oro para proporcionar una amplia distribución de mineralogía de cobre. La muestra de concentrado por gravedad se molió a continuación usando un molino de discos y se tamizó usando tamices de 150 y 106 μm . Lo mayor de 150 μm se recicló volviendo al molino.

El tamaño de partículas de la muestra molida usada en los experimentos de lixiviación era el 100 % -150 μm y el 80 % -106 μm . La muestra se envió para un análisis elemental usando digestión ácida seguida de análisis de soluciones para diferentes metales mediante Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente - ICP-OES). Las composiciones mineralógicas del concentrado por gravedad antes y después de la lixiviación se analizaron mediante una solución de mineralogía automatizada integrada que proporciona un análisis cuantitativo de minerales usando una Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy (Evaluación cuantitativa de minerales mediante la técnica de microscopía electrónica de barrido - QEMSCAN).

Todos los ejemplos se llevaron a cabo usando soluciones preparadas a partir de reactivos de pureza analítica y agua Millipore. A menos que se especifique, todos los experimentos se realizan usando un rodillo de botellas según la práctica de laboratorio convencional. El concentrado y la solución de glicina se colocaron en una botella de Winchester de 2,5 L. La suspensión se agitó haciendo rodar la botella en un rodillo de botellas a 150 rpm. Las botellas se ventilaron para permitir la transferencia de oxígeno, garantizando que la falta de oxígeno no limitara la velocidad de reacción.

En diferentes momentos, se obtuvieron muestras de la solución de lixiviación usando una jeringa o filtro de membrana (tamaño del poro 0,45 μm). Los filtrados se analizaron para determinar el cobre y el hierro usando una espectroscopía de adsorción atómica. Los oligoelementos se analizaron mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplada inductivamente (ICP-OES). El análisis elemental de residuos se realizó usando digestión ácida seguida de un análisis mediante ICP-OES.

A partir de los datos mostrados en la Tabla 13 puede observarse que, de los minerales de cobre comunes, la calcopirita (CuFeS_2) es el menos soluble en cianuro y otros óxidos de cobre y el cobre nativo muestran una alta solubilidad en soluciones de cianuro.

Tabla 13: Solubilidad de minerales de Cu en 1 % de solución de NaCN

Mineral	Fórmula	% de cobre disuelto
Azurita	$2\text{Cu}(\text{CO})_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$	94,5
Malaquita	$2\text{CuCO}_3(\text{OH})_2$	90,2
Calcocita	Cu_2S	90,2
Covelita	CuS	95,6
Calcopirita	CuFeS_2	5,60
Cobre nativo	Cu	90,0
Cuprita	Cu_2O	85,5
Bornita	$\text{FeS} \cdot 2\text{Cu}_2\text{S}$	70,0
Enargita	Cu_3AsS_4	65,8
Tetraedrita	$(\text{Cu} \cdot \text{Fe} \cdot \text{Ag} \cdot \text{Zn})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	21,9
Crisocola	$\text{CuSiO}_3 \cdot (\text{nH}_2\text{O})$	11,8

La Tabla 14 muestra el análisis elemental del concentrado de cobre y oro usado en los Ejemplos 16 a 21. El concentrado de cobre y oro tiene un 3,75 % de Cu distribuido entre un intervalo de minerales de cobre, incluido el cobre nativo.

Tabla 14: Análisis elemental del concentrado de cobre y oro

Concentración (%)

ID de la muestra	Au	Ag	Cu	As	Fe	Si	Ni	Al	K	Co	Pb	S
Conc.	0,213	0,03	3,75	0,76	11,6	27,0	0,06	2,0	0,69	0,34	0,12	11,4

Ejemplo 16: Lixiviación en dos etapas

Los experimentos mostraron que un 98 % de Cu se extrajo en 48 horas en una lixiviación en dos etapas en las siguientes condiciones: 0,3 M de glicina, 1 % de H₂O₂, pH 11,0, 23 °C y 16 % (% p/v) de densidad de pulpa. Las composiciones mineralógicas del concentrado de cobre y oro antes y después de la lixiviación se analizaron mediante QEMSCAN y se muestran en la Tabla 15. La Fig. 24 muestra también los porcentajes en masa para cada mineral de cobre en el concentrado antes y después de la lixiviación. Los resultados presentados en la Fig. 24 muestran que se disolvió el 100 % de los minerales de cobre metálicos y sulfuro de cobre, tales como bornita y calcocita/digenita. Se disolvió aproximadamente un 80 % de calcopirita. El análisis por QEMScan del residuo mostró que se produjo la calcopirita sin lixiviado como partículas liberadas en la fracción de tamaño más grande.

Tabla 15: Análisis mineralógico del cobre y de los minerales de ganga en el concentrado antes y después de la lixiviación (condiciones de lixiviación: 0,3 M de glicina, 1 % de H₂O₂, pH 11, temperatura ambiente)

Mineralogía a granel, % en masa		
Mineral	Antes de la lixiviación	Después de la lixiviación
Calcocita/digenita	1,46	0,01
Metal de Cu	1,30	0,00
Cuprita	0,88	0,00
Calcopirita	0,71	0,15
Bornita	0,27	0,02
Covelita	0,18	0,12
Sulfuros de Cu complejos y exóticos	0,09	0,00
Límites de Cu	0,34	0,02
Pirita	28,55	32,33
Pirita magnética	0,35	0,20
Arsenopirita	0,01	0,00
Cuarzo	48,49	51,28
Feldespatos	5,32	5,59
Calcita	0,12	0,10
Dolomita	0,09	0,11
Ankerita/Dolomita	0,78	0,61
Rutilo/Anatasa/Ilmenita	0,52	0,75
Hematita	0,69	1,71
Goetita	2,72	2,21
Otro	7,16	4,75

La Tabla 16 presenta el porcentaje de cada mineral de cobre disuelto después de la lixiviación en una solución de glicina. La presencia de covelita (CuS) en el residuo final puede atribuirse a la nueva precipitación de cobre durante la lixiviación según la Ec. (2). Algunos estudios han identificado la formación de covelita (CuS) durante la lixiviación de minerales de sulfuro de cobre, tales como calcopirita. Se puede concluir que la covelita se disuelve en las soluciones de lixiviación y se precipita de nuevo por la reacción del cobre con azufre o sulfuro durante la lixiviación.

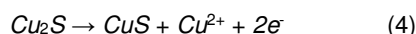
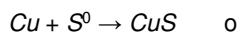


Tabla 16: Disolución observada de minerales de cobre en 0,3 M de solución de glicina a temperatura ambiente, 1 % de H₂O₂, pH 11.

Mineral	Disolución de Cu, %
Calcocita/digenita	100
Metal de Cu	100
Cuprita	100
Calcopirita	80

Bornita	92
Covelita	19
Sulfuros de Cu complejos y exóticos	99
Límites de Cu	95

La Fig. 25 muestra el diagrama esquemático de un circuito conceptual de lixiviación de cobre a contracorriente en dos etapas, indicado generalmente por el número 10 de referencia. Para lograr una alta disolución de cobre, la lixiviación puede realizarse en dos etapas 12, 14 (tal como usando dos reactores de lixiviación) con condiciones de lixiviación idénticas en cada etapa. En el estado estacionario, un concentrado 16 de Cu y Au recién preparado alimentará la primera etapa 12 y una solución 18 de lixiviación (enrase) recién preparada alimentará la segunda etapa 14. La etapa 12 de salida de la suspensión lixiviada se somete a una primera separación, 20, de sólidos/líquidos para producir una primera solución, 22, madre de lixiviación de cobre, y un residuo, 24, de lixiviación de sólidos. El residuo 24 se alimenta a la segunda etapa 14 de lixiviación. La suspensión lixiviada que sale de la segunda etapa 14 de lixiviación se somete a una segunda separación, 32, de sólidos/líquidos para producir el concentrado, 34, de oro y una segunda SML, 36, de cobre. La segunda SML se recicla en la primera etapa 12 de lixiviación como solución de lixiviación. La solución, 22, madre de lixiviación que contiene cobre se somete a la extracción electrolítica, 26, y la recuperación del cobre, 28. La solución estéril 30 de la etapa 26 de extracción electrolítica se recicla como solución de proceso para la segunda etapa 14 de lixiviación. La Tabla 18 muestra el cobre y otras concentraciones de impurezas en la solución de lixiviación final de las etapas 1 y 2.

Tabla 17: Cobre y concentraciones de impurezas en las soluciones de lixiviación finales en la etapa 1 y 2

ID de la muestra	Concentración (mg/l)											
	Cu	Au	As	S	Fe	Si	Ni	Co	Pb	K	Mg	Ca
ETAPA 1	4745	0,85	24,7	185	12,1	9,14	5,21	3,14	16,4	14,8	14,4	25,1
ETAPA 2	1069	1,28	29,4	146	6,69	6,45	4,34	2,27	10,2	9,2	2,99	14,1

Aproximadamente un 98 % de cobre se lixivió usando 0,3 mol/L de glicina a temperatura ambiente con solo aproximadamente 12 mg/l de Fe, 16 mg/l de Pb y una baja concentración de impurezas transferida a la solución madre. Parece que el hierro no se disuelve significativamente en las soluciones de glicina alcalinas.

La Fig. 26 muestra la disolución de cobre en función del tiempo después de la lixiviación en dos etapas. Puede observarse que se ha disuelto más del 98 % de cobre. También puede observarse que, después de 5 horas de lixiviación, la extracción de cobre es aproximadamente un 66 % de cobre y esta disolución inicial rápida de cobre se debe a la presencia de la cuprita altamente soluble y del cobre metálico en el concentrado.

Ejemplo 17: Lixiviación de una única etapa

En esta sección, la lixiviación de un concentrado de cobre y oro se realiza en una única etapa aumentando la concentración de glicina de 0,3 M a 0,4 M y prolongando el tiempo de lixiviación a 96 horas. La Fig. 27 muestra el porcentaje en masa de los minerales de cobre analizados por QEMSCAN antes y después de la lixiviación para una comparación. La extracción de cobre de la concentración de cobre en la solución de lixiviación final y del cobre en el residuo final fue de un 82 %. A partir de los resultados mostrados en la Fig. 27, es evidente que se ha disuelto el 100 % de calcocita, cuprita, cobre metálico y solo el 50 % de calcopirita. Es interesante observar que, como se muestra en la Fig. 27, el cobre se ha precipitado de nuevo como una covelita (CuS) o como cobre muy fino bien adsorbido en arcillas o incorporado en los silicatos (límites de Cu).

Ejemplo 18: Efecto del pH

En la Fig. 28 se muestra el efecto del pH de la solución de lixiviación en la disolución de cobre. Puede observarse que la disolución inicial de cobre a pH inferior (pH 8,0) es superior a la disolución a pH 10 y 11,5. Sin embargo, al prolongar el tiempo de lixiviación se descubrió que la disolución de cobre aumenta a pH más alcalino (p. ej., pH 11,5). A partir de los resultados mostrados en la Fig. 28, puede observarse que la disolución de cobre aumenta ligeramente aumentando el pH de la lixiviación de pH 10 a pH 11,5.

Ejemplo 19: Efecto del peróxido

Para estudiar el efecto del uso de peróxido como un oxidante en una lixiviación de cobre en una solución de glicina se añadieron un 0 %, un 1 % y un 2 % de peróxido a 0,3 M de una solución de glicina a temperatura ambiente. Los resultados mostrados en la Fig. 29 muestran que el peróxido aumenta ligeramente la disolución de cobre.

El resultado más interesante aquí es que la extracción de cobre alcanza hasta un 75 % en una solución que contiene solo glicina (sin peróxido) en un rodillo de botellas ventiladas que permite suficiente transferencia de oxígeno del aire circundante.

Ejemplo 20: Efecto de la densidad de la pulpa

5 Para estudiar el efecto de la densidad de la pulpa en la lixiviación de cobre en una solución de glicina, se usaron un 10, un 16 y un 20 % de densidades de pulpa. En la Fig. 30 se muestra el efecto de la densidad de la pulpa en una disolución de cobre. Aumentando la densidad de la pulpa de un 10 % a un 20 % disminuye la extracción de cobre en aproximadamente un 10 %. Se cree que la disminución de la extracción de cobre en una densidad de pulpa más alta puede atribuirse principalmente a la eficiencia de la transferencia de oxígeno a la solución de lixiviación.

10 Ejemplo 21: Efecto de la concentración de glicina

En la Fig. 31 se muestra el efecto de la concentración de glicina en la disolución del cobre. Es evidente que aumentando la concentración de glicina, la extracción de cobre aumenta ligeramente. En general puede indicarse que la disolución del cobre depende de la concentración de glicina en las soluciones de peróxido y glicina.

15

REIVINDICACIONES

1. Un proceso para la recuperación de metal que comprende cobre y/o un metal precioso de un material que contiene metales, que incluye las etapas de:
5
 - lixiviar el material que contiene metales con una solución alcalina que tiene un pH de al menos 9 y que contiene un lixivante que comprende un aminoácido o un derivado suyo del mismo para producir un lixiviado que contiene metales; y
 - extraer el metal del lixiviado,
10 en donde el aminoácido comprende glicina a una concentración de al menos 0,01 M.
2. El proceso de la reivindicación 1, en donde el metal comprende un metal precioso y la etapa de lixiviación comprende lixiviar un material que contiene metales preciosos con una solución alcalina que contiene el aminoácido o un derivado suyo del mismo y un oxidante a una temperatura elevada para producir un lixiviado que contiene metales preciosos.
15
3. El proceso de la reivindicación 2, en donde el oxidante contiene oxígeno, tal como un peróxido, dióxido de manganeso o un gas que contiene oxígeno.
- 20 4. El proceso de la reivindicación 3, en donde el oxidante es peróxido de hidrógeno y la cantidad de peróxido de hidrógeno en solución es al menos un 0,005 % en peso, tal como un 0,5 % en peso o mayor, y es preferiblemente un máximo de un 5 % en peso, tal como un máximo de un 1 %.
- 25 5. El proceso de una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 4, en donde la solución incluye además un catalizador de lixiviación que comprende especies cúpricas (cobre(II)) que está presente preferiblemente en una concentración de al menos 1 mM y más preferiblemente hasta 10 mM.
6. El proceso de la reivindicación 1, en donde la lixiviación se lleva a cabo a temperatura ambiente.
- 30 7. El proceso de una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 5, en donde el proceso se lleva a cabo a una temperatura elevada, preferiblemente al menos 30 °C, tal como al menos 40 °C.
8. El proceso de cualquier reivindicación anterior, en donde el derivado de aminoácido comprende un péptido, tal como un di- o tripéptido. El proceso de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el derivado de aminoácido comprende un péptido, tal como un di- o tripéptido.
35
9. El proceso de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde la concentración de aminoácido en la solución de lixiviación es un máximo de 2 M.
- 40 10. El proceso de cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en donde el pH está dentro de un intervalo de 9 a 13 y está preferiblemente por encima de 10.
- 45 11. Un proceso de lixiviación diferencial para la recuperación de cobre y metales preciosos de un material que contiene cobre y metales preciosos, que incluye las etapas de:
50
 - lixiviar el cobre y el material que contiene metales preciosos con una solución alcalina que tiene un pH de al menos 9 y que contiene un lixivante que comprende glicina o un derivado suyo de la misma en primeras condiciones que comprenden temperatura ambiente y/o la ausencia de un oxidante para producir un lixiviado que contiene cobre y residuos que contienen metales preciosos;
 - lixiviar el residuo que contiene metales preciosos con una solución alcalina que tiene un pH de al menos 9 y que contiene un lixivante que comprende glicina o un derivado suyo de la misma en segundas condiciones que comprenden temperatura elevada y/o la presencia de un oxidante para producir un lixiviado que contiene metales preciosos;
 - extraer el cobre del lixiviado que contiene cobre; y
 - 55 extraer el metal precioso del lixiviado que contiene metal precioso.

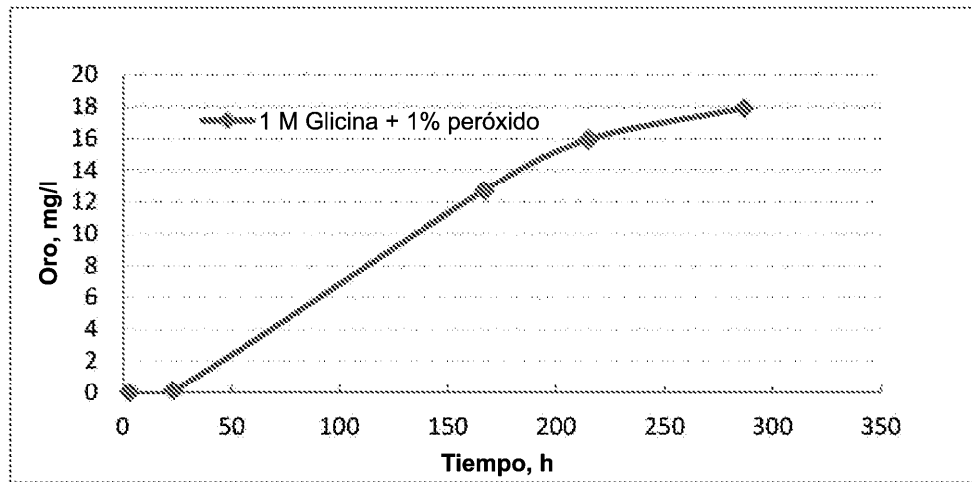


Figura 1

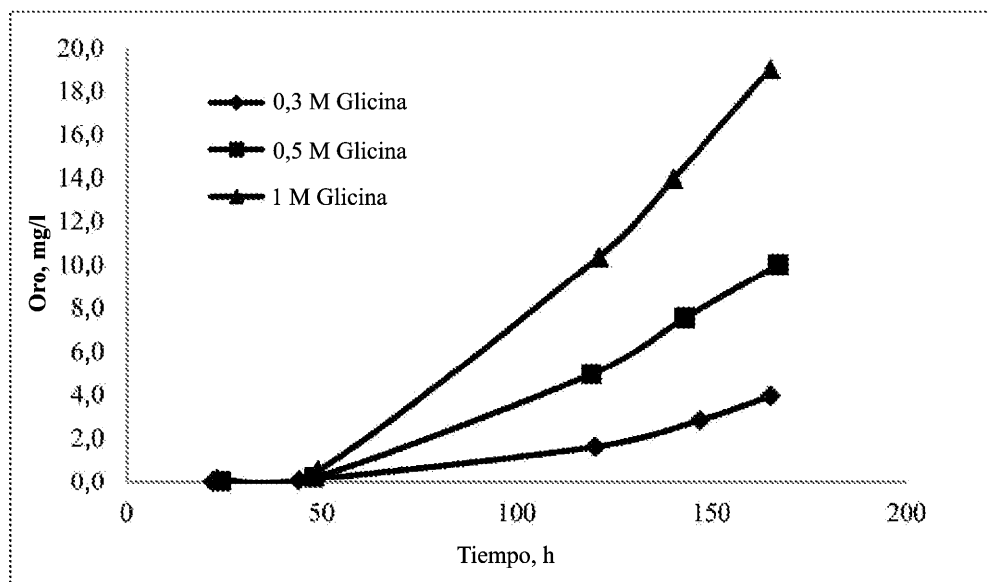


Figura 2

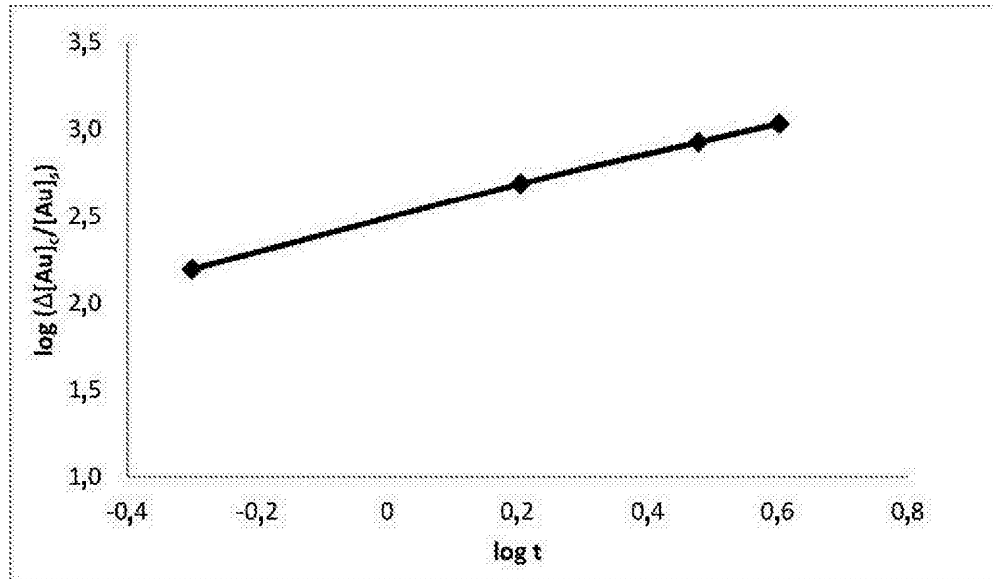


Figura 3

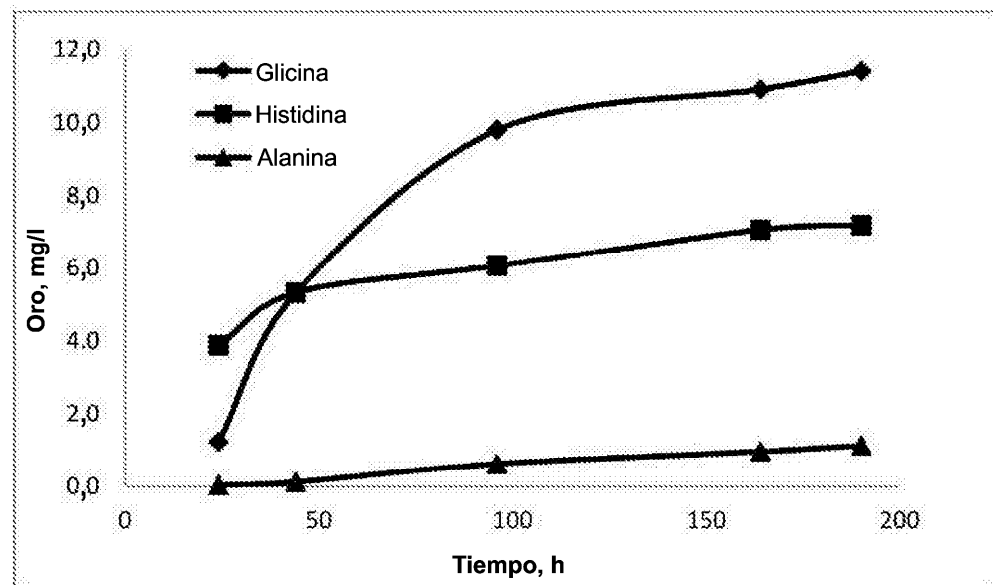


Figura 4

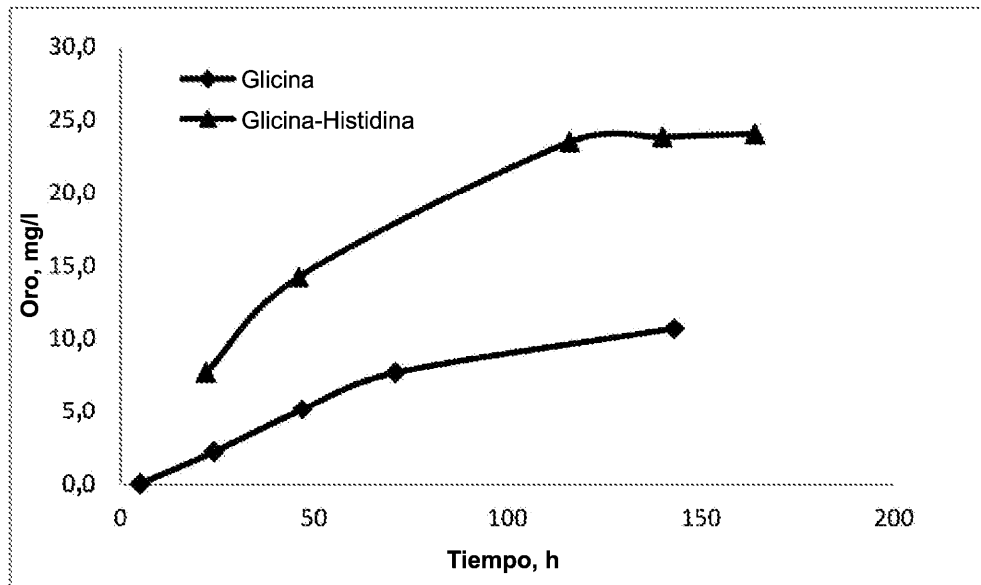


Figura 5

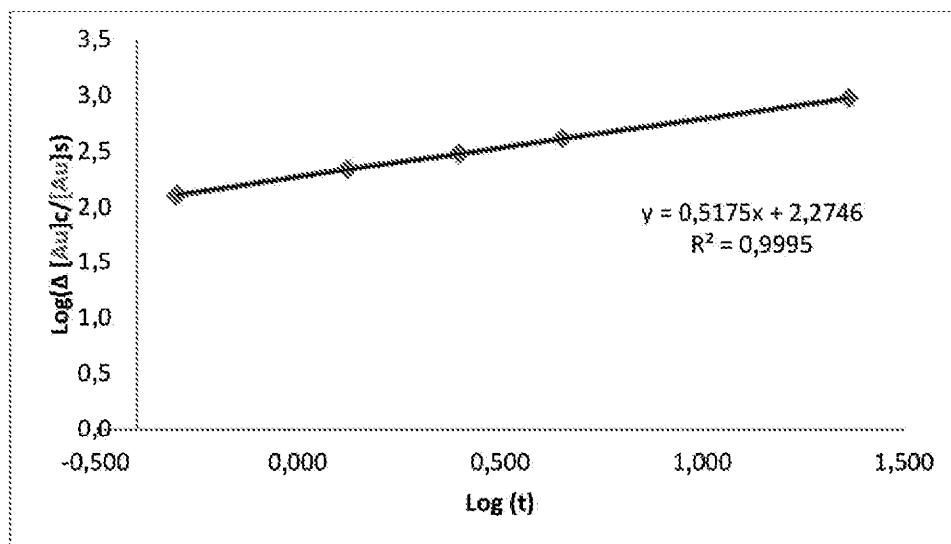


Figura 6

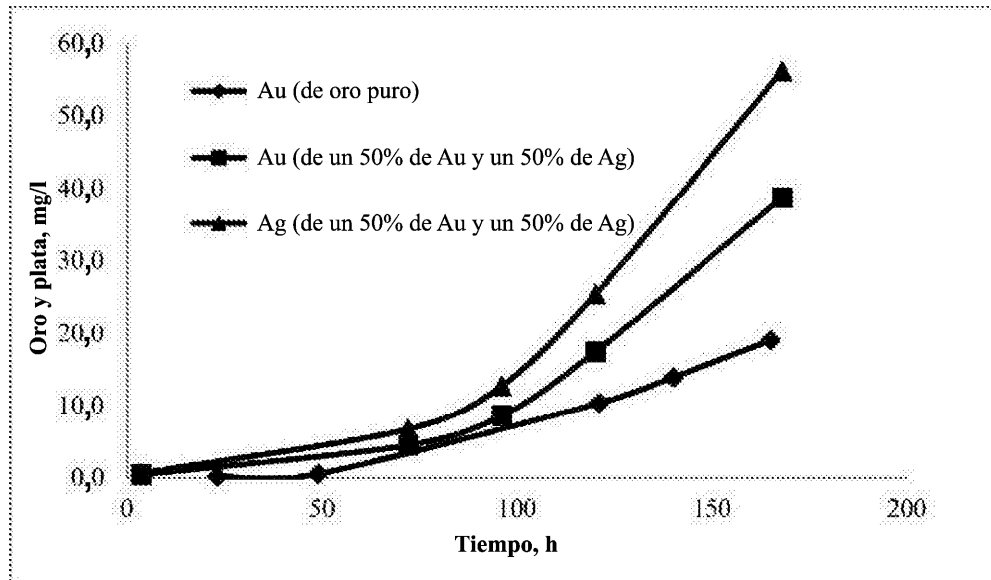


Figura 7

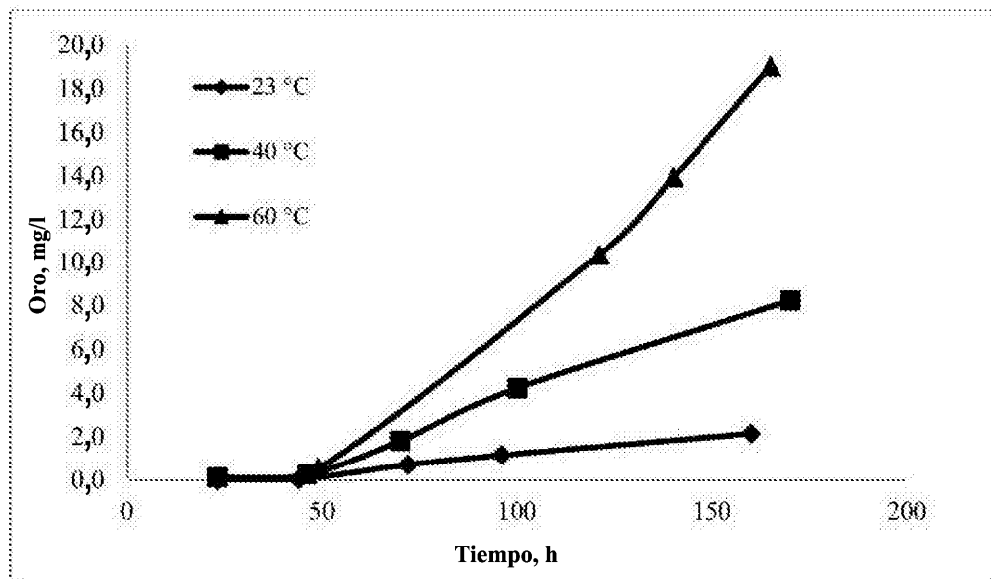


Figura 8

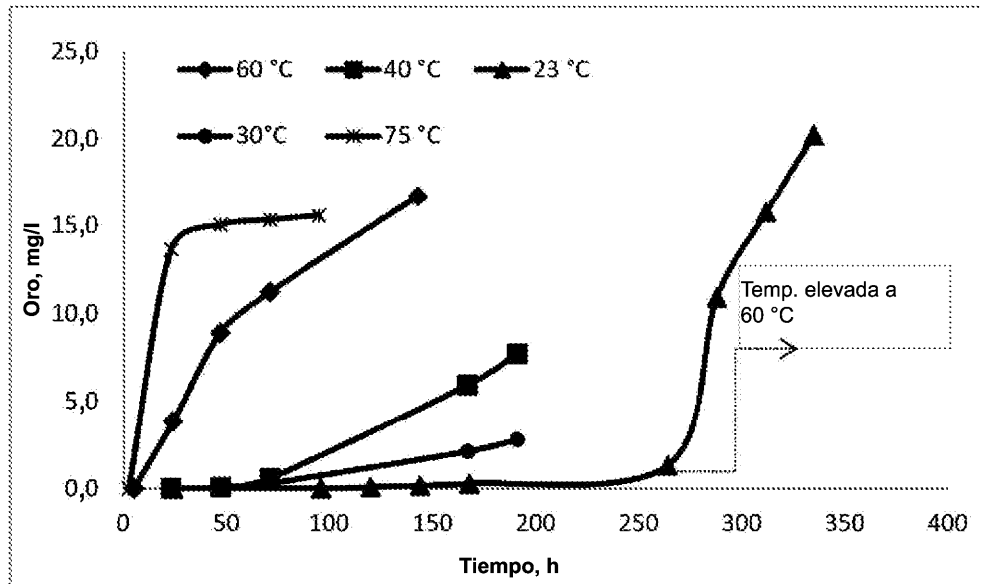


Figura 9

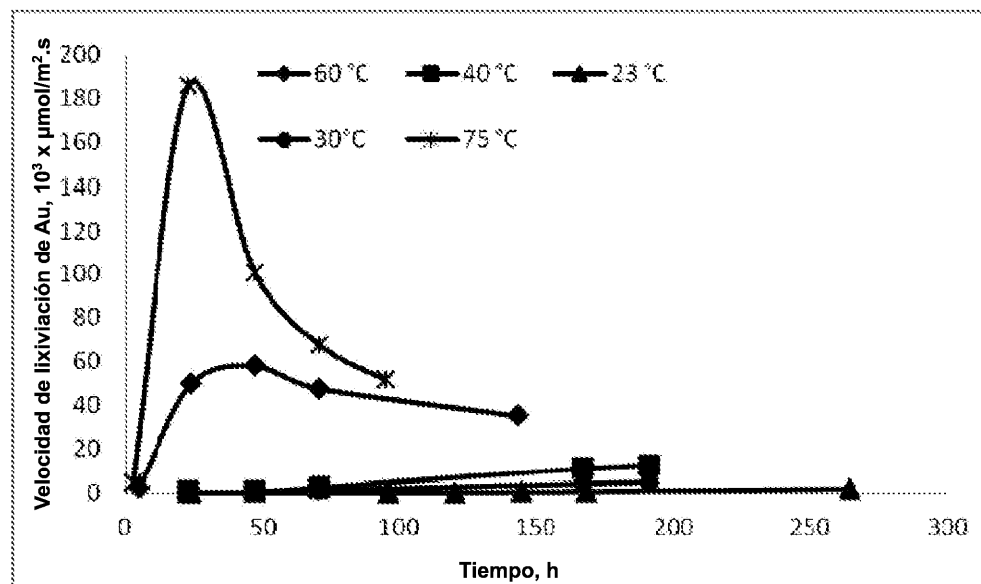


Figura 10

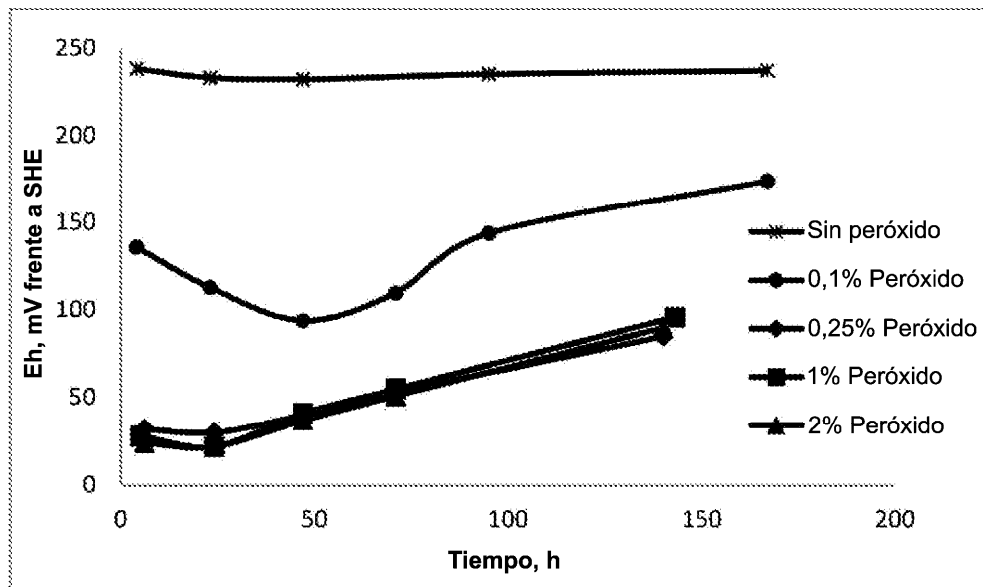


Figura 11

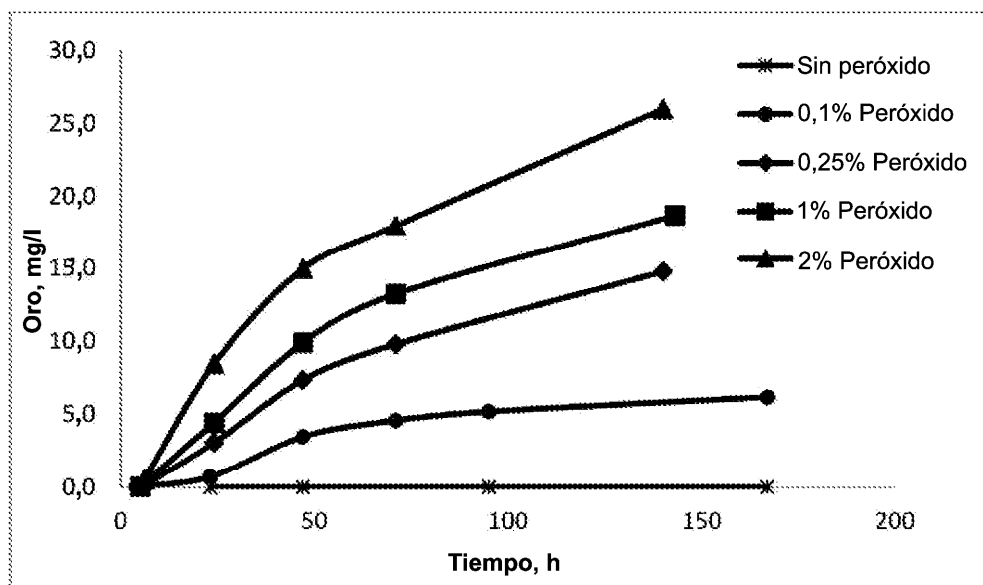


Figura 12

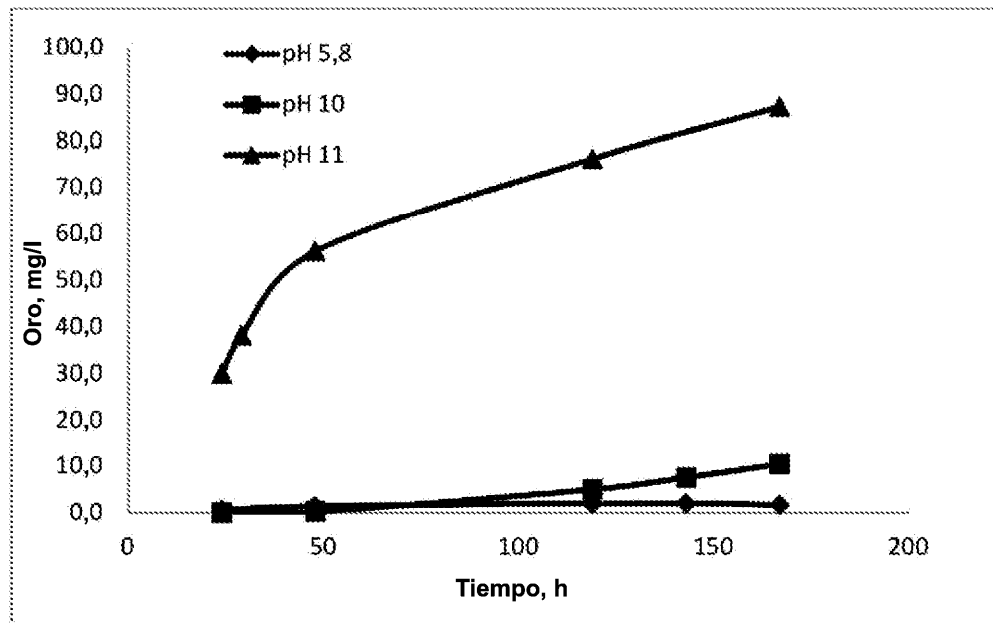


Figura 13

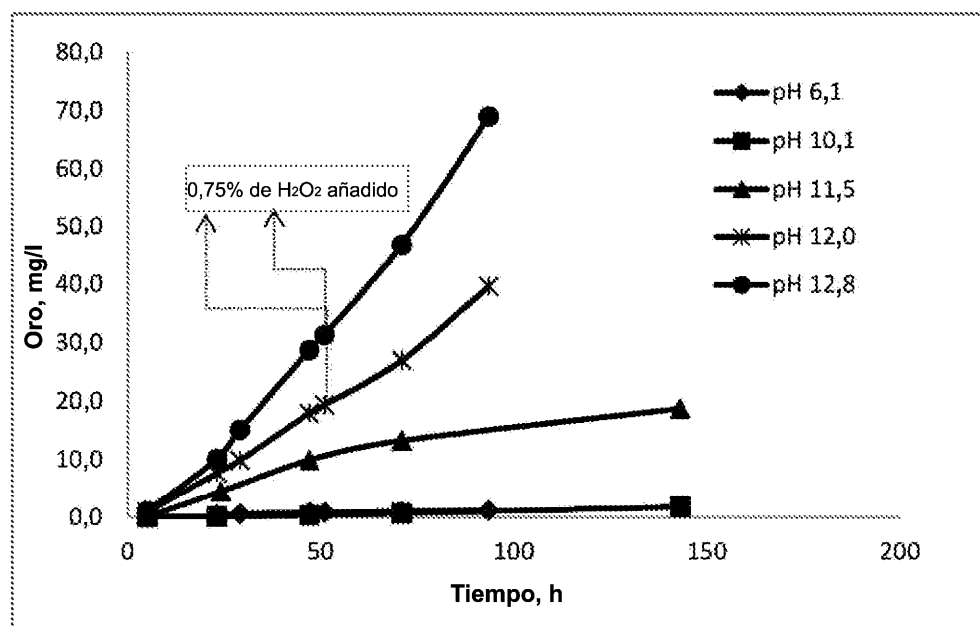


Figura 14

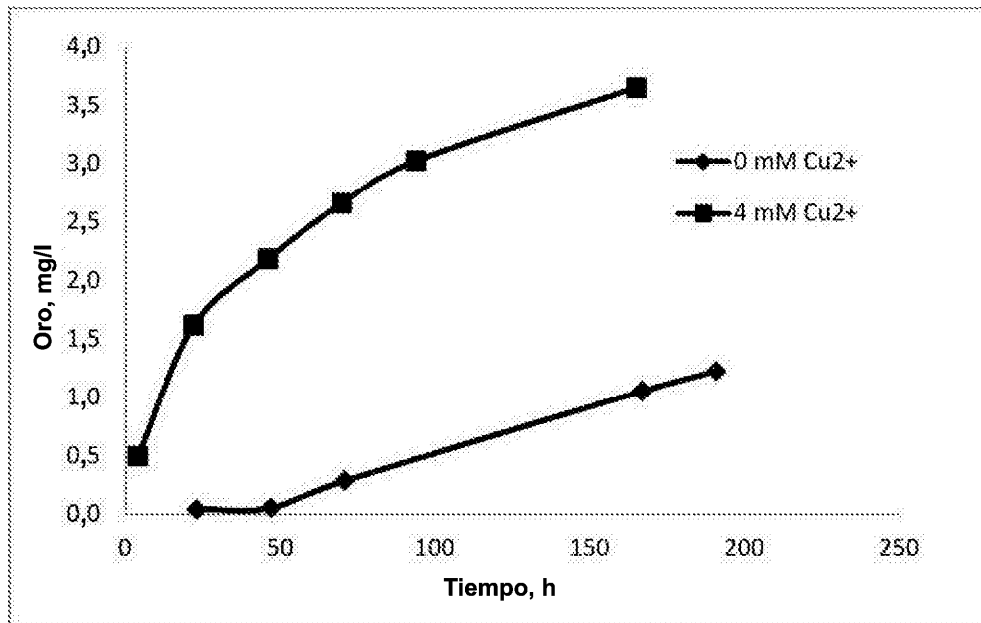


Figura 15

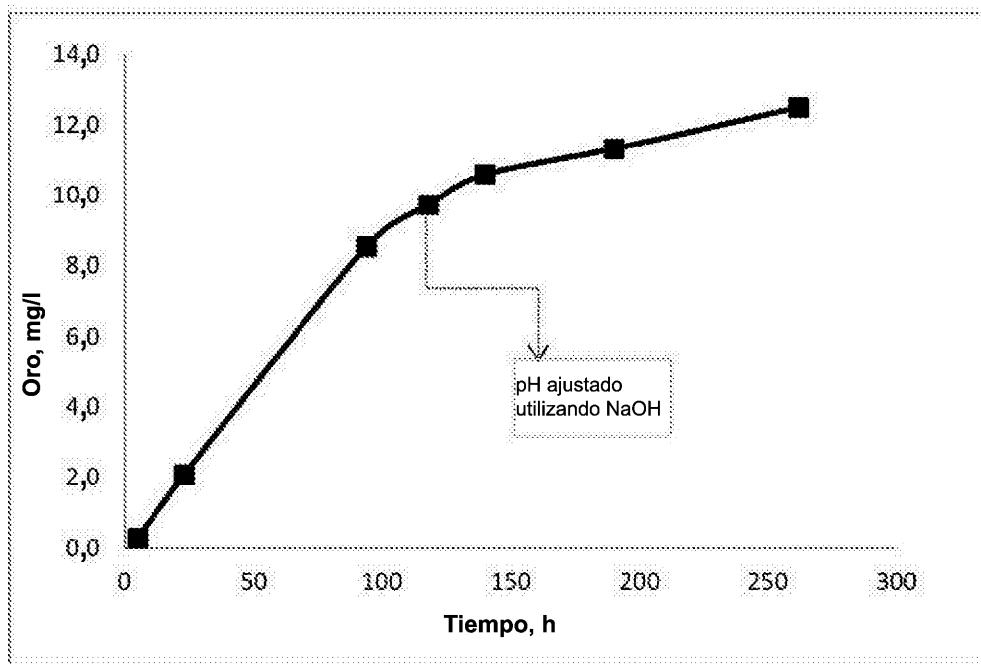


Figura 16

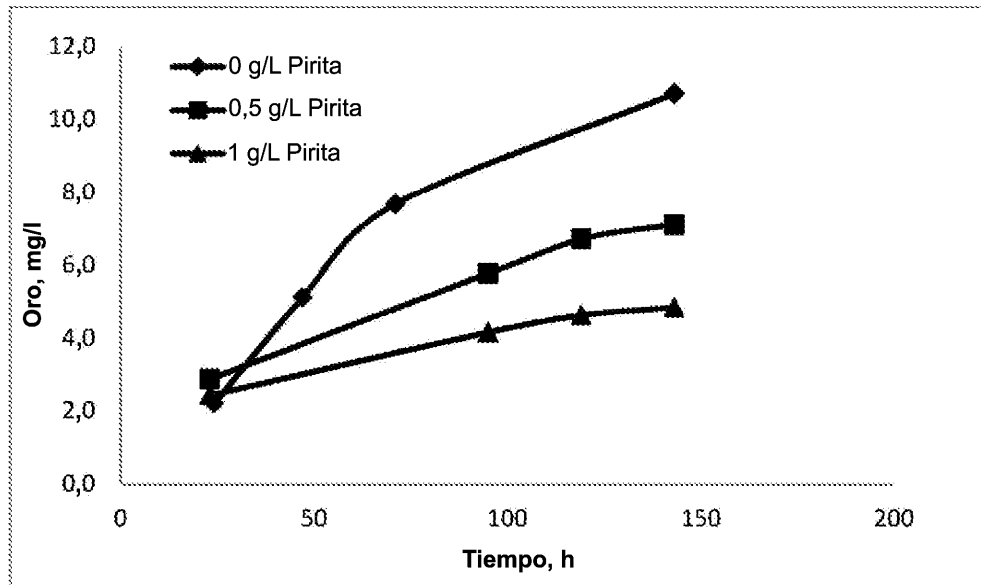


Figura 17

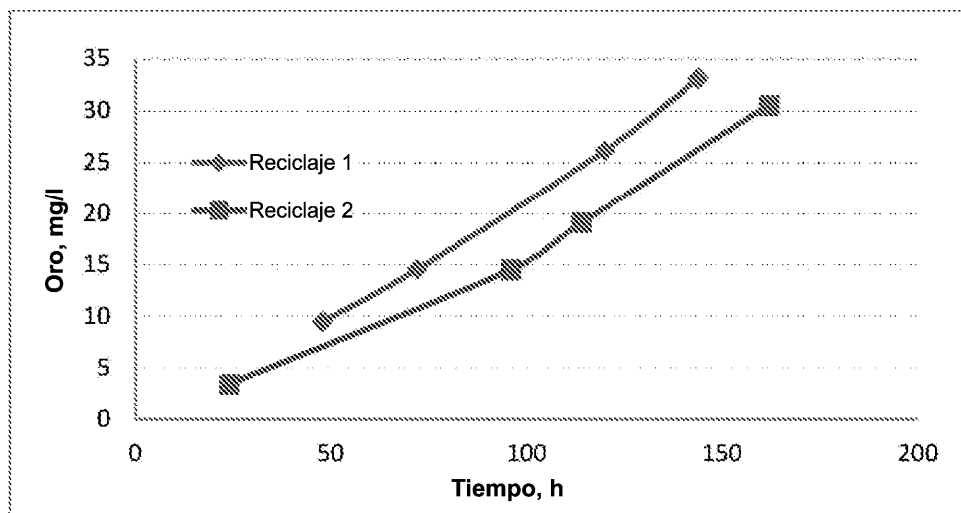


Figura 18

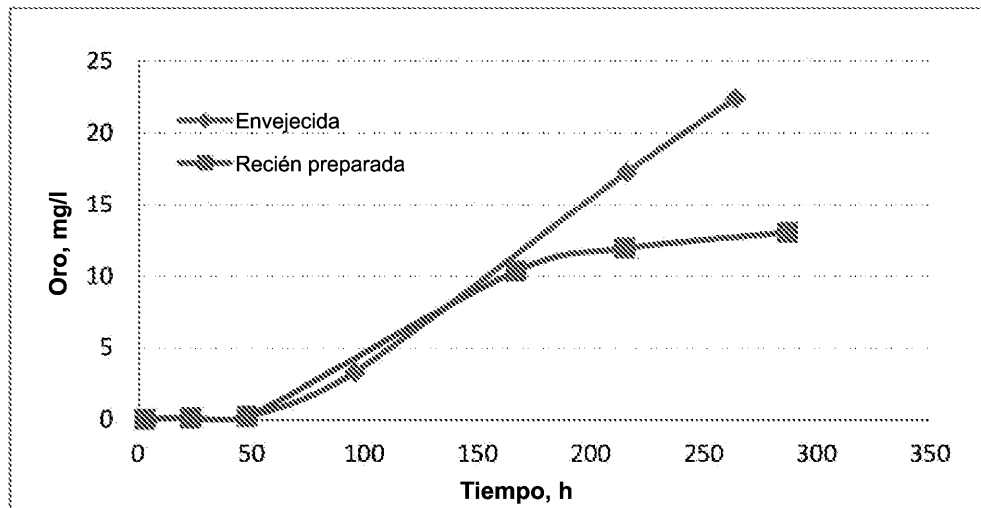


Figura 19

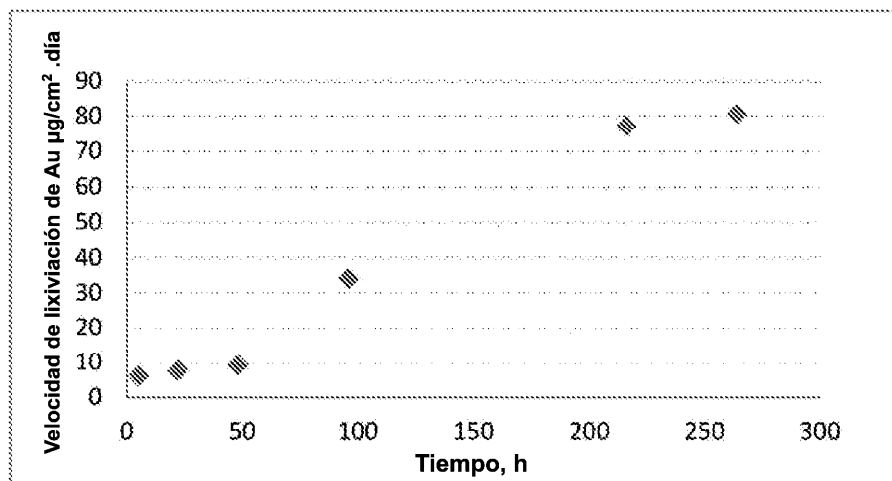


Figura 20

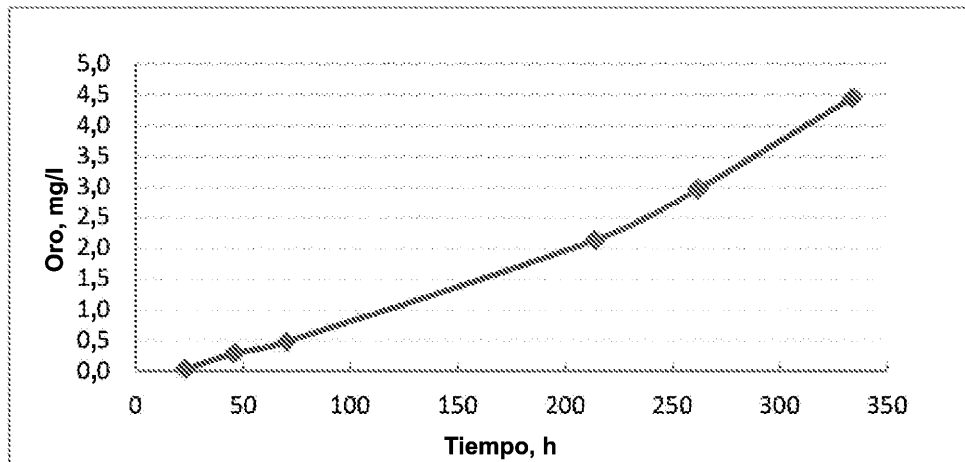


Figura 21

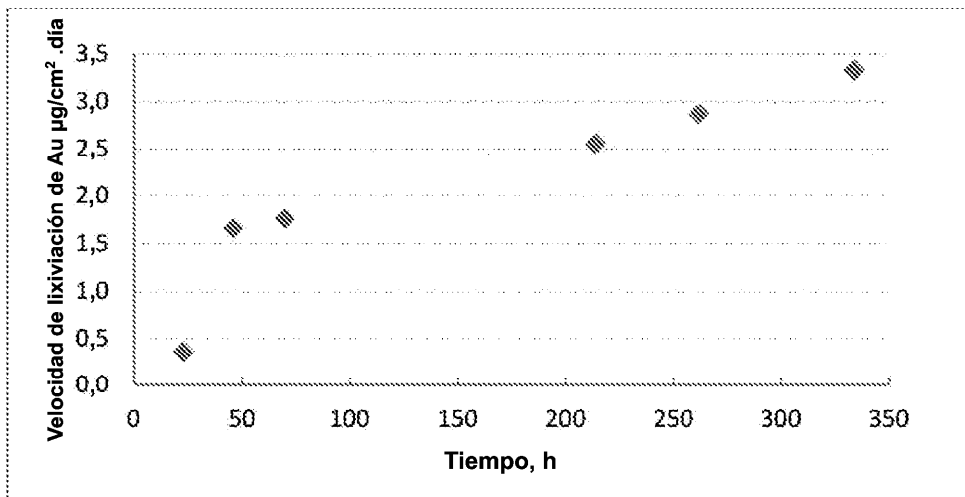


Figura 22

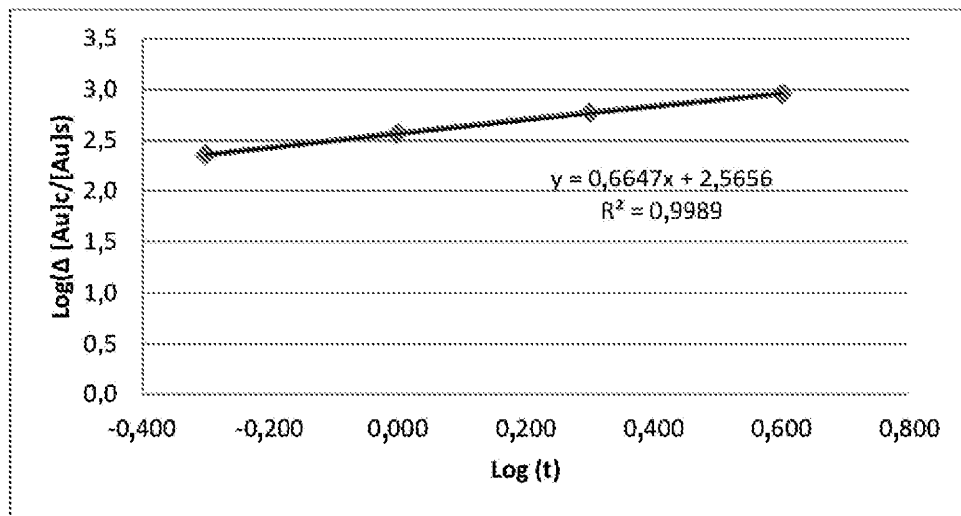


Figura 23

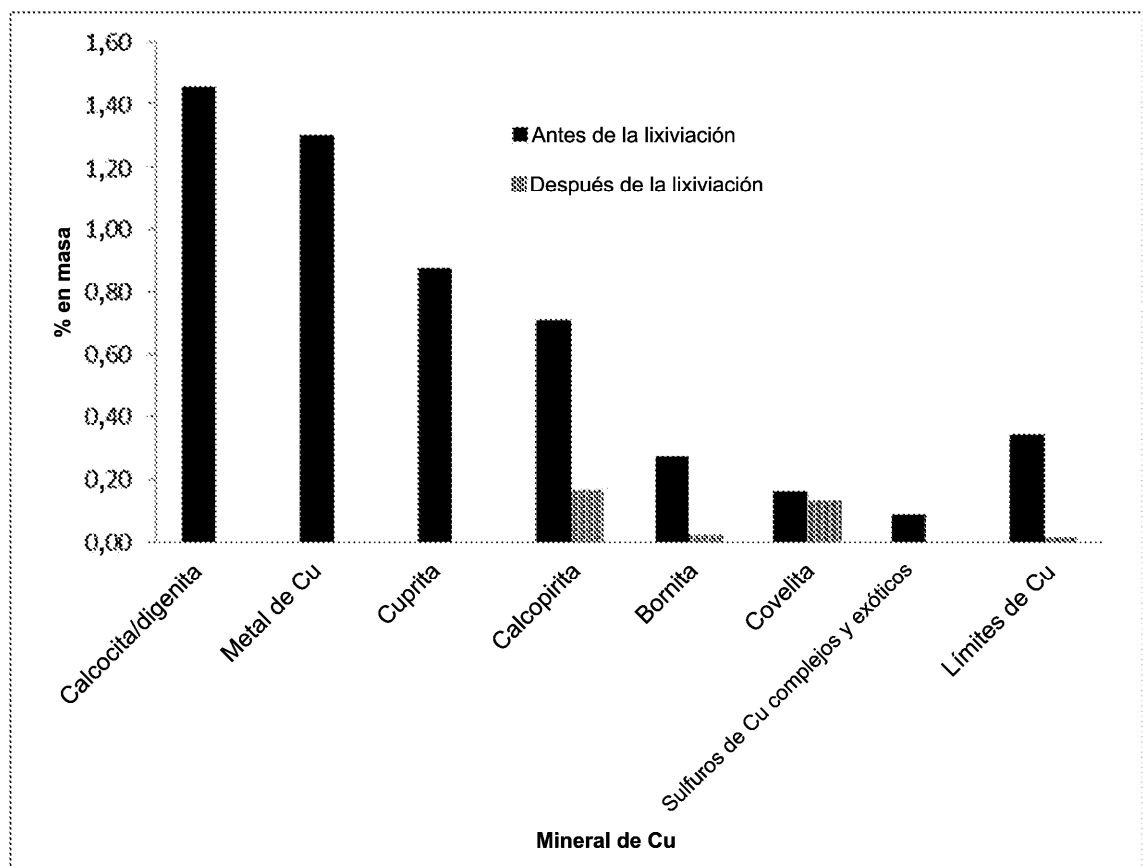


Figura 24

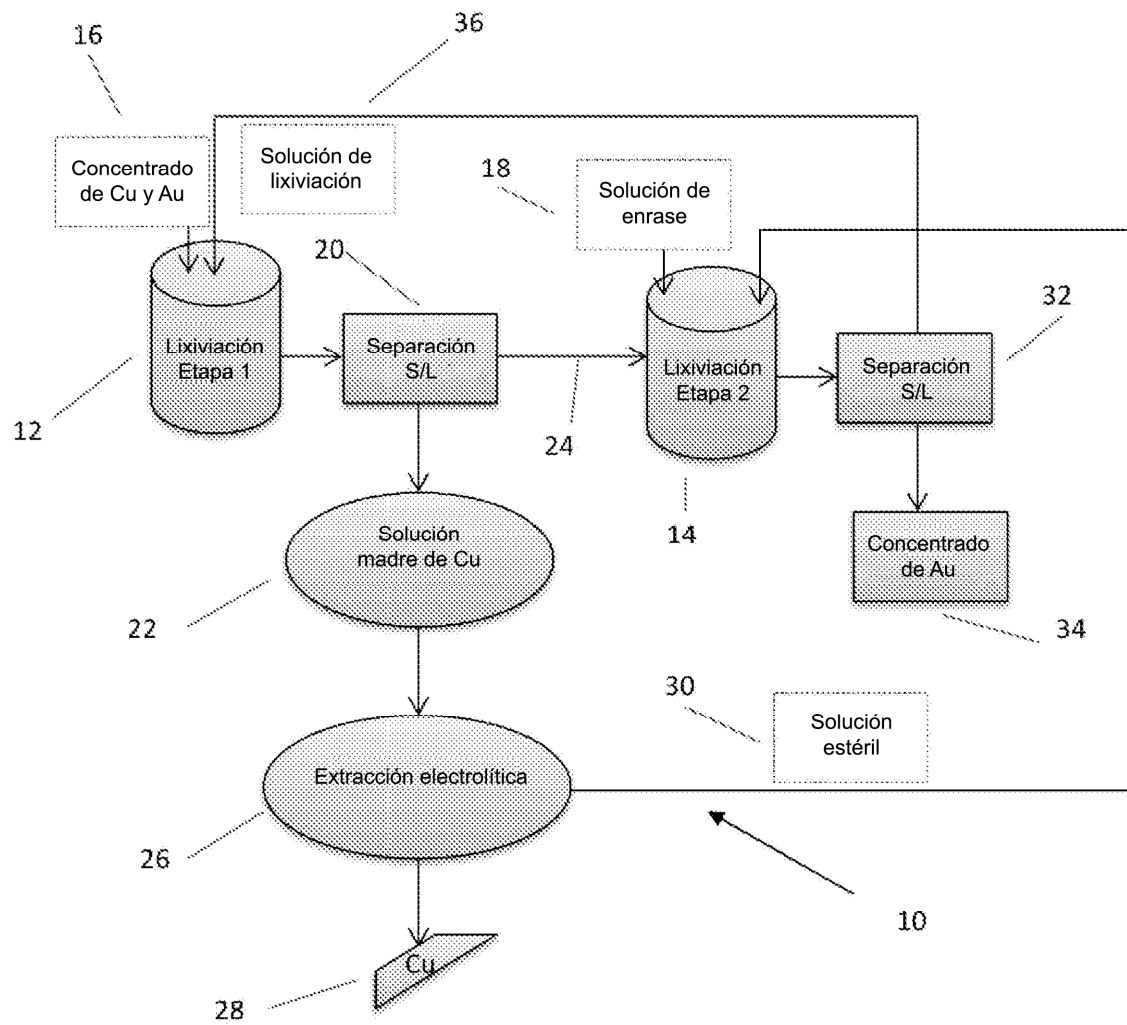


Figura 25

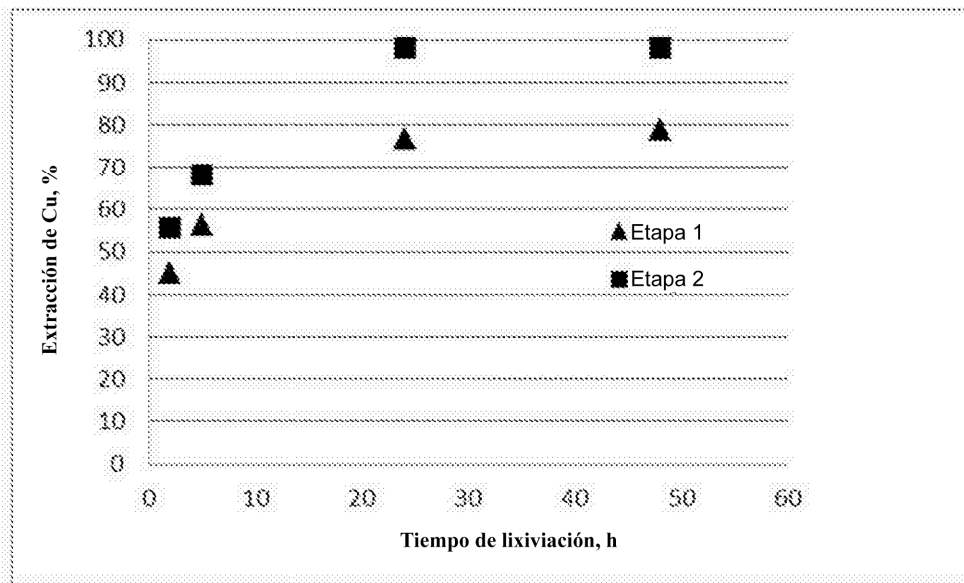


Figura 26

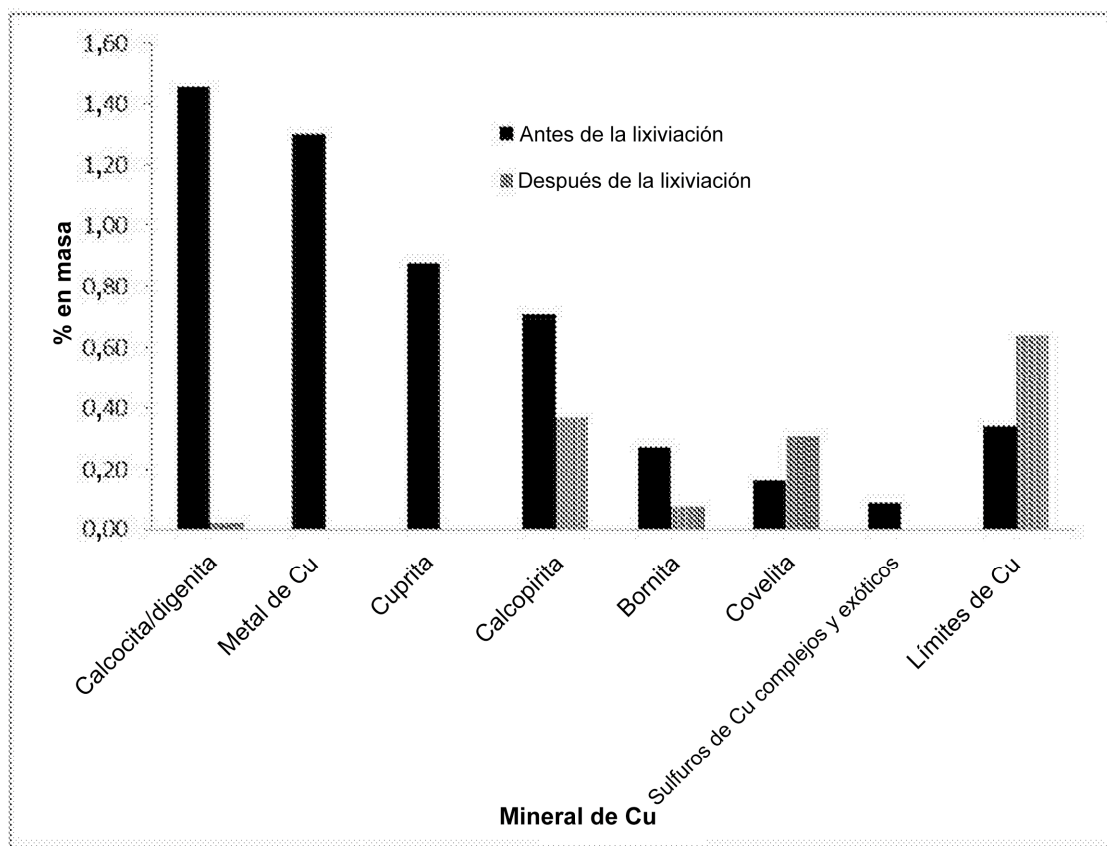


Figura 27

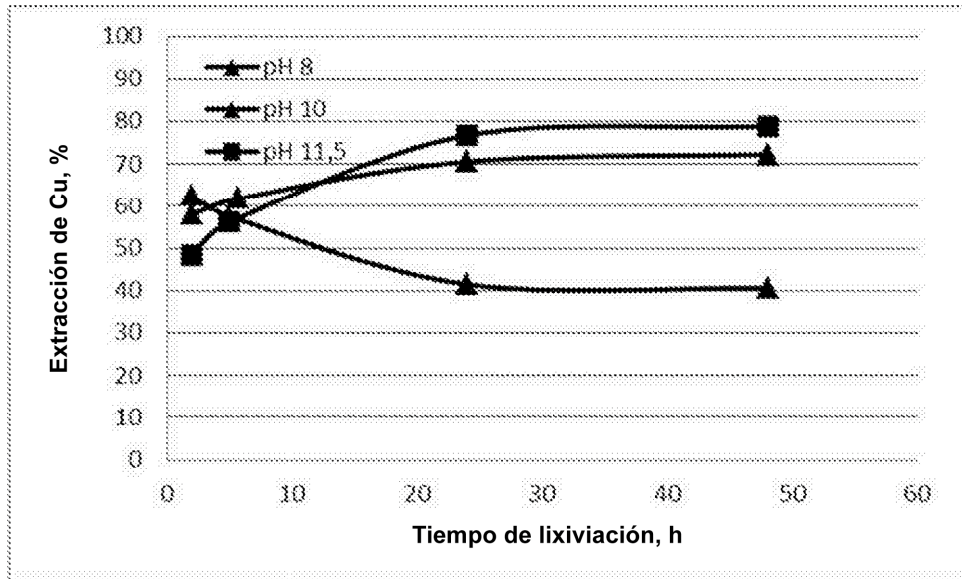


Figura 28

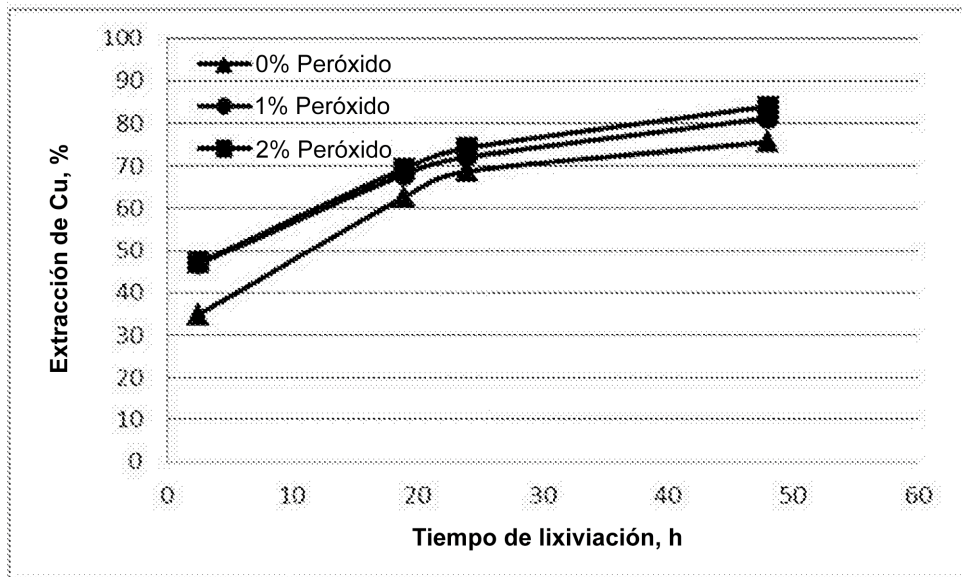


Figura 29

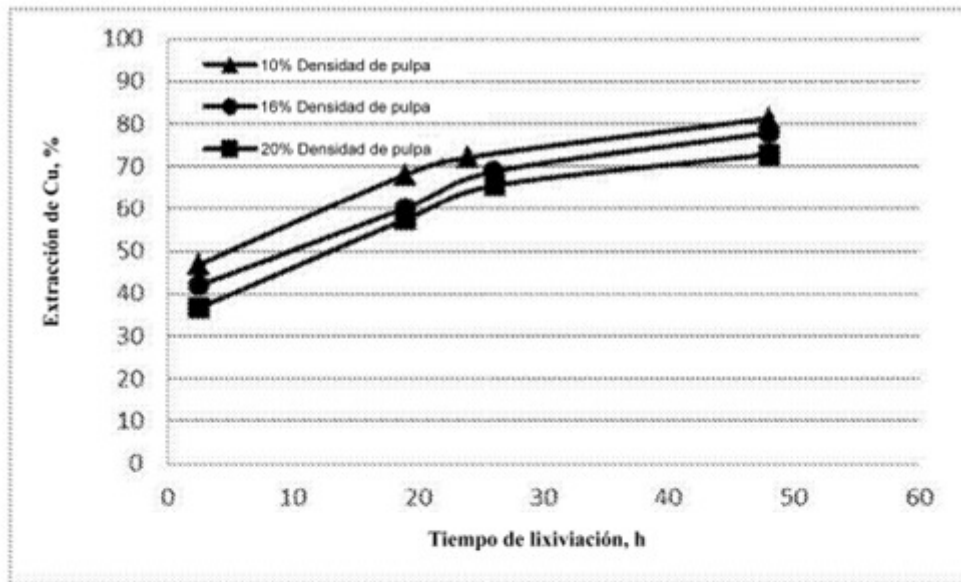


Figura 30

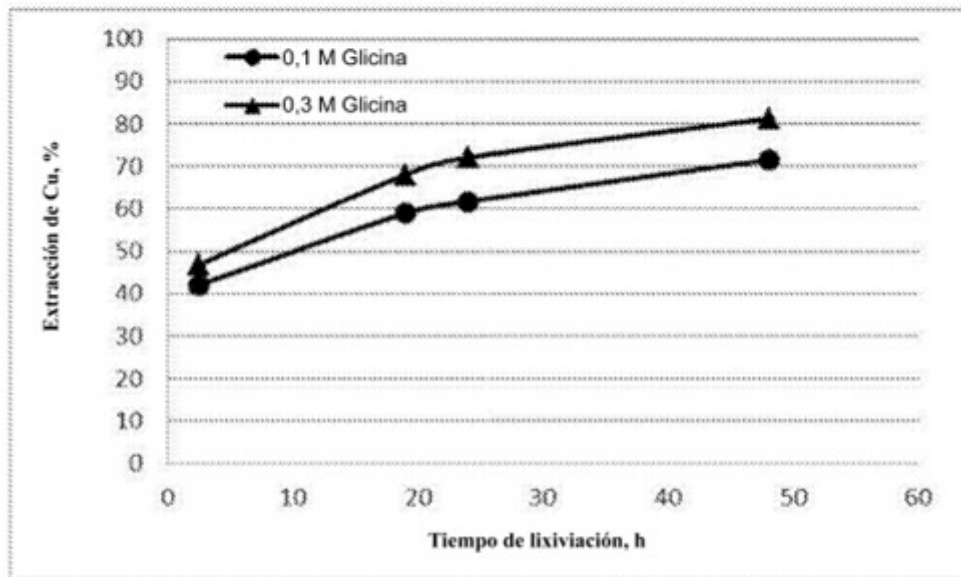


Figura 31