



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 297 686**

51 Int. Cl.:  
**C22B 3/18** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **05726181 .0**

86 Fecha de presentación : **19.01.2005**

87 Número de publicación de la solicitud: **1713942**

87 Fecha de publicación de la solicitud: **25.10.2006**

54 Título: **Proceso de bio-lixiviación en montón.**

30 Prioridad: **30.01.2004 ZA 04/0466**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**01.05.2008**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**01.05.2008**

73 Titular/es: **BHP Billiton SA Limited**  
**200 Hans Strijdom Drive**  
**2194 Randburg, ZA**

72 Inventor/es: **Du Plessis, Chris, Andre y**  
**De Kock, Sanet, H.**

74 Agente: **Elzaburu Márquez, Alberto**

ES 2 297 686 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 de bio-lixivación en montón.

### 5 Antecedentes de la invención

Esta invención se refiere en general a un proceso de bio-lixivación en montón para la recuperación de uno o más metales de un mineral.

10 La invención se describe a continuación con particular referencia a la recuperación de cobre de un mineral marginal de baja calidad (por ejemplo menos del 0,7% de cobre) que contiene minerales de sulfuro refractarios primarios tal como calcopirita. Sin embargo, lo que a continuación se expone es solamente a modo de ejemplo y los principios de la invención se pueden usar en otras circunstancias apropiadas para la recuperación de diferentes metales a partir de diferentes minerales.

15 El proceso de bio-lixivación en montón de cobre es un proceso de lixivación mediado por microorganismos (bacteriano y arquea) en donde:

20 los microorganismos oxidan el hierro ferroso a hierro férrico; el hierro férrico facilita un ataque inicial en el azufre mientras que los microorganismos que oxidan al azufre además oxidan las especies de azufre reducidas a sulfato; la oxidación microbiana de tales especies de azufre resulta con la liberación de calor;

25 el calor generado tiene implicaciones importantes para el subsiguiente proceso de lixivación, particularmente para los minerales de cobre primarios tales como calcopirita que no se lixivian bien a bajas temperaturas (por debajo de 45°C) y que requieren elevadas temperaturas de hasta 65°C para conseguir una velocidad de lixivación satisfactoria; y se genera ácido que es importante para el proceso de lixivación y para mantener al cobre en la disolución.

30 Para conseguir temperaturas en montón elevadas conducentes a la lixivación en montón de la calcopirita se requieren poblaciones secuenciales de microorganismos de bio-lixivación. Esto es necesario porque los microorganismos que predominan a temperatura ambiente, en la puesta en marcha del montón, son no capaces de crecer y de contribuir al proceso de bio-lixivación a elevadas temperaturas. Por ejemplo, las cepas microbianas con un óptimo de temperatura de 35°C tendrían una actividad relativamente baja a 45°C y superiores, mientras que las cepas con un óptimo de temperatura a 65°C tendrían una actividad relativamente baja a 45°C.

35 Como se conoce en la técnica, el oxígeno y el dióxido de carbono se suministran en la forma de aire a un montón de lixivación. El oxígeno se requiere para las reacciones de oxidación químicas y microbiológicas mientras que el dióxido de carbono se requiere como una fuente de carbono para los microorganismos.

40 El uso de poblaciones microbianas secuenciales con el aumento del óptimo de temperatura se requiere para elevar la temperatura del montón de lixivación desde la temperatura ambiente hasta un valor en el cual tiene lugar la lixivación de la calcopirita. El aumento de la temperatura da como resultado calor que se genera por las bacterias y las arqueas que oxidan azufre.

45 Se sabe como evaluar la actividad de bio-lixivación dentro de un montón controlando la velocidad de conversión del hierro ferroso a hierro férrico, además de la recuperación del cobre. Un indicio de la velocidad de oxidación del hierro ferroso se puede obtener relativamente y fácilmente a partir de la disolución del licor rico que drena del montón, bien midiendo la relación del hierro ferroso a hierro férrico en la disolución o controlando el potencial redox, que es una función de la relación de ferroso a férrico.

### 50 Resumen de la invención

55 La invención proporciona un método de funcionar un proceso de lixivación de montón de mineral mediado por agentes microbianos que incluye la etapa de cambiar al menos un parámetro de operación para elevar la temperatura en el montón cuando el suministro de carbono llega a ser limitante para la actividad microbiana, y de ese modo elevar la generación de calor por la oxidación del azufre, en el montón.

60 El parámetro o los parámetros de operación se pueden cambiar adicionando el carbono en cualquier forma adecuada al montón. Por ejemplo, el carbono se puede adicionar como dióxido de carbono por ejemplo enriqueciendo el contenido en dióxido de carbono en una corriente de aire suministrada al montón. El carbono se puede proporcionar alternativamente o de forma adicional bajo la forma de minerales que contienen carbonato que se adicionan al montón, o bajo la forma de carbono orgánico de bajo coste, tal como melaza, un extracto de levadura o similares.

65 Alternativamente, o de forma adicional, el parámetro de operación se cambia adicionando calor al montón. Esto se puede hacer de cualquier modo adecuado, por ejemplo calentando una disolución de irrigación que se suministra al montón; calentando aire que se suministra al montón; por calentamiento solar del montón; aplicando aislamiento térmico al montón para reducir las pérdidas de calor, o similares.

## ES 2 297 686 T3

Para calentar el montón también es posible hacer uso de cualquiera de las técnicas descritas en la descripción de la Solicitud de Patente Internacional N° PCT/ZA2001/00154. El contenido de esta descripción se incorpora a la presente invención en esta descripción.

5 El método puede incluir la etapa de controlar el montón para detectar una actividad microbiana reducida y, una vez que tal detección ocurre, iniciar el cambio en el parámetro de operación.

10 La limitación del carbono se puede controlar comparando las concentraciones del dióxido de carbono en el flujos de salida frente a la concentración en el flujo de entrada. Tal control se podría llevar a cabo conjuntamente con el control de la evolución del calor en el montón, ya que esto confirmará las limitaciones del crecimiento. Si el dióxido de carbono es limitante, entonces será beneficiosa la adición de carbono para el crecimiento microbiano y para la generación de calor.

15 En el intervalo de 45°C a 60°C, la medición del dióxido de carbono no es del todo significativa pues los microbios no fijan el dióxido de carbono muy eficientemente, y porque una fracción significativa de los requisitos de carbono proporcionados a esta temperatura se podrían proporcionar por los compuestos de carbono liberados por las bacterias que se descomponen y que se habían acumulado durante los intervalos de crecimiento de baja temperatura previos. En este intervalo de temperatura, la limitación al crecimiento microbiano se detectaría de una forma más exacta controlando la evolución del calor en el montón. Esto se puede hacer de cualquier modo adecuado y por ejemplo  
20 se puede hacer uso de la columna de simulación de lixiviación de montón descrita en la descripción de la Solicitud de Patente Internacional N° PCT/ZA2004/000025 cuyo contenido se incorpora a la presente invención en esta descripción.

25 Una vez que la velocidad de generación de calor para de disminuir en el intervalo 45°C a 60°C sería un indicio suplementar los microbios termófilos moderados con la adición de carbono orgánico por ejemplo bajo la forma de un extracto de levadura, ya que el carbono orgánico se ha mostrado que es más eficaz en estimular el crecimiento de estos microbios que el dióxido de carbono.

30 De ese modo, la operación del montón se puede simular bajo condiciones de laboratorio para determinar las circunstancias en las cuales la actividad microbiana reducida llega a ser evidente y a continuación, esta información se usa en el método de la invención para determinar el momento en el cual se cambia el parámetro de operación.

35 Alternativamente, la etapa de cambiar el parámetro de operación se puede iniciar a una temperatura concreta o predeterminada, por ejemplo 45°C, en la que se conoce que una temperatura más allá desciende la velocidad de la generación de calor, debida a la actividad microbiana, hasta un nivel inaceptable.

### Breve descripción de los dibujos

40 La invención se describe adicionalmente por medio de un ejemplo con relación a los dibujos que se acompañan en los que:

45 La Figura 1 representa gráficamente el proceso de aumentar la generación de calor a partir de la oxidación de especies de azufre reducidas;

La Figura 2 representa esquemáticamente un principio bajo el cual se basa la invención; y

50 La Figura 3 es una representación del diagrama de bloques de la forma en la que se implementa el método de la invención.

### Descripción de la realización preferente

55 La invención se basa en el descubrimiento, puesto de manifiesto como un resultado de ensayos de laboratorio, de que la relación CO<sub>2</sub>:O<sub>2</sub> en la que estos dos compuestos se consumen en un montón es aproximadamente 10 veces mayor que la velocidad a la que estos compuestos están presentes en el aire, haciendo de ese modo que el dióxido de carbono, y no el oxígeno, sea el factor más limitante para la velocidad del crecimiento microbiano (en la ausencia de otras limitaciones) y por lo tanto, para la generación de calor.

60 Un factor adicional es que los efectos de la actividad microbiana en un montón, a saber la oxidación del hierro ferroso y la oxidación del azufre, no ocurren a una relación fija del uno con el otro. De ese modo, una velocidad de oxidación microbiana del hierro ferroso satisfactoria no implica que la velocidad de oxidación del azufre microbiana de acompañamiento también sea satisfactoria. Aunque estos procesos están relacionados y a menudo se desarrollan simultáneamente por los mismos microorganismos, las velocidades relativas de estas reacciones, y el grado en que resultan afectadas bajo condiciones óptimas de actividad microbiana, no se fijan a una relación constante.

## ES 2 297 686 T3

Hay un número de razones por las que las velocidades de oxidación del azufre, contrariamente a la práctica mencionada en el preámbulo de esta invención, no se pueden deducir a partir de las velocidades de oxidación del hierro ferrosos. Estas razones incluyen las siguientes:

- 5 (a) la energética microbiana relacionada con estos compuestos son diferentes, es decir se deriva más energía de la oxidación de las especies reducidas del azufre que de las especies de hierro ferroso;
- (b) están implicadas enzimas diferentes;
- 10 (c) algunas cepas microbianas tienen solamente capacidad para la oxidación del hierro ferroso mientras que otras sólo tienen capacidad de oxidación del azufre;
- (d) las cepas y las enzimas activas responsables para los procesos de oxidación tienen a menudo diferentes respuestas cinéticas a las condiciones ambientales predominantes; y
- 15 (e) el hierro ferroso es mucho más móvil en el contexto de la lixiviación en montón que las especies reducidas de azufre, aumentando de ese modo la probabilidad de la oxidación microbiana del primero.

Además, mientras que la mayor parte del hierro presente en la disolución que está en contacto con el mineral está en el estado férrico, más que en el estado ferroso, el impacto de la actividad microbiana está casi enteramente en el fenómeno de la oxidación del azufre (y de ese modo en la generación de calor) con su subsiguiente efecto en la cinética de lixiviación del cobre. La detección y aclaración de este efecto no se logra fácilmente.

Otro factor es que la velocidad de oxidación del hierro ferroso parece que es menos sensible a las condiciones microbianas adversas que la velocidad de la oxidación del azufre, haciendo de ese modo que el control de la relación hierro ferroso/hierro férrico (o potencial redox) sea un mal indicador de la oxidación del azufre.

Durante un proceso de bio-lixiviación la población microbiana, inoculada inicialmente en el montón, se multiplica debido al crecimiento microbiano. A medida que la concentración microbiana aumenta, también se aumenta la demanda de dióxido de carbono, como fuente de carbono. Los datos obtenidos controlando las velocidades de consumo del dióxido de carbono y del oxígeno en una columna de simulación de lixiviación de montón del tipo descrito en la descripción de la Solicitud de Patente de Sudáfrica N° 2003/9936, e inoculada a una concentración total de células de  $3 \cdot 10^{10}$  células  $\text{ton}^{-1}$ , muestra que las velocidades de consumo del dióxido de carbono podrían alcanzar valores de 0,15 gramos de  $\text{CO}_2$   $\text{h}^{-1}$   $\text{ton}^{-1}$  con velocidades de consumo del oxígeno de 8,1 gramos de  $\text{O}_2$   $\text{h}^{-1}$   $\text{ton}^{-1}$  (a un caudal de gas de 0,23  $\text{Nm}^3$   $\text{h}^{-1}$   $\text{ton}^{-1}$ ) dentro de un período de 100 días usando un tamaño de partícula de mineral de un diámetro de 12 mm con un contenido de pirita de 3% (p/p) y un contenido total de cobre de 0,6% (p/p) del que el 50% del cobre estaba presente como calcocita o covellita y el 50% restante como calcopirita. La relación de la masa del dióxido de carbono consumido por los microorganismos a la masa del oxígeno consumida por los microorganismos es aproximadamente 0,0185. El dióxido de carbono suministrado al proceso de lixiviación vía el sistema de suministro de aire se consumía virtualmente el 100%, mientras que sólo se consumía aproximadamente el 20% del oxígeno. A partir de esta observación y del hecho de que la relación de la masa de dióxido de carbono a la masa de oxígeno en el aire es aproximadamente 0,0022, está claro que la disponibilidad de dióxido de carbono es probable que llegue a ser limitante para el crecimiento microbiano antes de que la disponibilidad de oxígeno llegue a ser limitante.

Las velocidades de crecimiento microbiano óptimas, y la generación de calor asociada procedente de la oxidación del azufre, pueden no ser alcanzables cuando se usan caudales de aire del montón típicos de 0,02 - 0,08  $\text{Nm}^3$   $\text{h}^{-1}$   $\text{ton}^{-1}$ . Los caudales de aire generalmente se restringen en este intervalo (siendo dependientes, entre otros factores, del contenido en sulfuro del mineral) debido a la necesidad de conservar y de mantener el calor en el interior del montón, es decir un caudal de aire elevado tiende a enfriar el montón y por lo tanto, el caudal de aire se debe limitar para mantener el calor en el interior del montón. Sin embargo, esta restricción en el caudal de aire para conservar calor, también limita la velocidad de suministro del dióxido de carbono a los microorganismos que oxidan al azufre, evitando de ese modo su crecimiento óptimo y, por lo tanto, limitando su capacidad de generación de calor. Además, tal caudal de aire restringido tendrá como resultado una distribución no uniforme del crecimiento microbiano en un montón que se está lixivando, acumulándose la mayoría del carbono consumido (y de ese modo el crecimiento microbiano y la generación de calor) principalmente en la parte inferior del montón mientras que el resto del montón está virtualmente desprovisto del dióxido de carbono y de ese modo del crecimiento microbiano. De este modo, el control del caudal de aire tiene dos resultados que están en conflicto en términos de generación de calor (vía acción microbiana) y de mantenimiento del calor.

Las técnicas actuales para calcular los requisitos de flujo de aire en los montones se basan en el requisito estequiométrico del oxígeno para la oxidación del azufre disponible a sulfato y del hierro ferroso a férrico, además de para la oxidación de otros compuestos reducidos a sus formas equivalentes oxidadas. Se cree que tal análisis razonado basado en la estequiometría es erróneo porque asume que el proceso está gobernado por la disponibilidad de oxígeno y de especies reducidas (susceptibles de ser oxidadas) y asume que los microbios que tienen que catalizar las reacciones de oxidación están presentes en un número de células suficientes y actividad adecuada. La presencia de un número de células microbianas adecuado no es necesariamente la causa para que en el caso de la presencia de oxígeno y de especies químicas susceptibles de ser oxidadas no de necesariamente como resultado la oxidación de tales especies y un

subsiguiente proceso de bio-lixiviación eficaz. Los microbios requeridos para catalizar la reacción de bio-lixiviación biológica se tienen que suministrar en concentración suficiente o cultivados “*in-situ*” para conseguir concentraciones suficientes de células en el montón. Tal cultivo “*in-situ*” requiere, entre otros compuestos, un suministro adecuado de carbono.

5

Aparte del problema general de que un suministro inadecuado de dióxido de carbono puede ser limitante para el crecimiento (y de ese modo ser limitante para la generación de calor) existe un problema compuesto en el intervalo de temperatura de 45°C - 60°C. Aunque se sabe que las cepas microbianas capaces de bio-lixiviación ocurren en todos los intervalos de temperatura relevantes, estudios del laboratorio han indicado una actividad microbiana reducida, en términos de velocidades de oxidación del hierro ferroso y de velocidades de oxidación de azufre, en el intervalo de temperaturas de 45°C - 60°C cuando se comparan con intervalos de temperatura más altos y más bajos. La actividad microbiana reducida es una función de la cinética de crecimiento dependiente de la temperatura y ésta empeora por el hecho de que las bacterias y las arqueas que son capaces de crecer en este intervalo de temperatura generalmente requieren elevadas concentraciones de dióxido de carbono, o la adición de carbono orgánico, para conseguir velocidades óptimas de crecimiento y de oxidación del azufre. El impacto práctico de estos factores se ha determinado *in-situ* a partir de resultados obtenidos en una columna de simulación de lixiviación en montón del tipo descrito en la descripción de la Solicitud de Patente Internacional N° PCT/ZA2004/000025. En tres ocasiones (usando diferentes tipos de mineral con pirita de 1,5%, 3% y 6%, respectivamente) la columna de simulación alcanzó una meseta de temperatura media a aproximadamente 50°C a 55°C que se corresponde con una región de actividad microbiana baja obtenida en los resultados del laboratorio y que ocurre debido a una velocidad reducida de la oxidación microbiana del azufre y de ese modo en la generación de calor. A menos que se pueda superar esta meseta de temperatura, no se pueden conseguir fácilmente temperaturas que excedan de 50°C, imposibilitando de ese modo el logro de la recuperación significativa del cobre de los minerales que contienen el cobre predominante como calcopirita.

La generación de calor en un montón de bio-lixiviación es dependiente de la oxidación de las especies reducidas de azufre. La oxidación de tales especies de azufre genera la mayoría del calor en el contexto de lixiviación en montón. La mayor parte de tales reacciones de oxidación, de azufre reducido a sulfato, ocurren a través de reacciones por mediación microbiana. El oxígeno se usa como un agente receptor de electrones en este proceso y, como una consecuencia del crecimiento microbiano que usa azufre como una fuente de energía, no es un conductor del crecimiento microbiano. Los microbios usan la energía derivada de la oxidación del azufre para fijar el dióxido de carbono, es decir para producir metabolitos celulares, y de ese modo crecer y proliferar. Por lo tanto, la velocidad de oxidación del azufre está gobernada por la velocidad a la que los microbios requieren energía (crecimiento). La velocidad de crecimiento microbiana, a su vez, es críticamente dependiente del factor limitante más numeroso para tal crecimiento. Tal factor limitante podría ser oxígeno, dióxido de carbono, energía (azufre en este caso) u otros nutrientes tales como nitrógeno, etc. Estas relaciones se muestran gráficamente en la Figura 1.

La Figura 2 de los dibujos adjuntos es un gráfico de la temperatura versus el tiempo en un montón en el que tiene lugar una lixiviación microbiana. El montón se inocula inicialmente con una población mixta que entre otras cosas contiene cepas mesófilas y cepas mesófilas moderadas que pueden funcionar en el intervalo de temperatura desde una temperatura ambiente a aproximadamente 45°C usando el dióxido de carbono que está disponible del flujo de aire que atraviesa el montón. El flujo de aire se controla para asegurar que el caudal de aire no sea tan alto que ejerza un efecto de enfriamiento en el montón.

A aproximadamente 45°C, como se indica previamente, la actividad microbiana comienza a reducirse y a menudo para los microorganismos no es posible aumentar la temperatura dentro del montón a través de un intervalo de temperatura de aproximadamente 45°C a 60°C. Esto es particularmente problemático cuando el contenido de pirita (fuente principal de azufre, y de ese modo de calor) es menos del 3% p/p. Si la temperatura del montón se puede elevar a aproximadamente 60°C, a continuación los microorganismos termófilos de la población microbiana inoculada en el montón son generalmente capaces de continuar el proceso de lixiviación a estas elevadas temperaturas usando el dióxido de carbono del flujo de aire normal que atraviesa el montón.

Es posible conducir la velocidad de crecimiento microbiano reducida en el intervalo de temperatura mencionado anteriormente mediante la adición de un manto (es decir, independientemente de la temperatura en el montón) de dióxido de carbono o de una fuente de carbono diferente que pueda ser usada por las bacterias y arqueas de bio-lixiviación. Sin embargo esto podría incurrir en elevados costes de operación de la lixiviación en montón, o provocar potenciales efectos de inhibición (en el caso de carbono orgánico) para las bacterias mesófilas de bio-lixiviación.

En el intervalo de 45°C a 60°C la limitación no se debe principalmente a la limitación de dióxido de carbono sino más bien a que una menor velocidad de crecimiento cinético cohibe intrínsecamente a los microbios que operan en este intervalo. Sin embargo, este problema todavía se puede superar por la adición de carbono, particularmente bajo la forma de carbono orgánico (por ejemplo extracto de levadura), para así mejorar la actividad de tales microbios. Así, aunque las razones para las velocidades de crecimiento lentas a temperaturas por debajo de 45°C y a temperaturas en el intervalo del 45°C al 60°C son diferentes, ambos problemas se pueden, al menos hasta cierto punto, superar por la adición de carbono.

65

La Figura 3 de los dibujos adjuntos representa esquemáticamente la forma en la que se implementa el método de la invención. Un montón 10 que contendría normalmente un mineral marginal del cobre de baja calidad con un sulfuro primario refractario, por ejemplo calcopirita, se inocula usando las técnicas convencionales con una población micro-

## ES 2 297 686 T3

biana mixta 11. Sin ser limitante, esta población podría incluir especies los siguientes grupos del género bacteriano y arquea para cada categoría de temperatura:

5 ambiente - 45°C: *Acidithiobacillus*, *Leptospirillum*, *Thiobacillus*, *Acidimicrobium*, *Sulfobacillus*, *Ferroplasma* (*Ferriplasma*), *Ferrimicrobium*, *Acidiphilum*, *Alicyclobacillus*;

45°C - 60°C: *Acidithiobacillus*, *Thiobacillus*, *Acidimicrobium*, *Sulfobacillus*, *Ferroplasma* (*Ferriplasma*), *Thermoplasma*, *Alicyclobacillus*, *Ferrimicrobium*;

10 y >60°C: *Sulfolobus*, *Acidianus*, *Metallosphaera*, *Ferroplasma* (*Ferriplasma*), *Thermoplasma*.

El aire 12 aspirado de la atmósfera se suministra al montón a una velocidad que se controla por un mecanismo de control 14. Como se ha descrito anteriormente, el aire contiene suficiente dióxido de carbono para posibilitar a las cepas microbianas en el montón que funcionen eficazmente en términos de velocidades de oxidación del hierro ferroso y de velocidades de oxidación del azufre, hasta una temperatura de aproximadamente 45°C.

La velocidad a la que se suministra el aire 12 se manipula para asegurar que los requisitos de carbono de la población microbiana se satisfacen sin que el aire ejerza un efecto de enfriamiento significativo en el montón.

20 A una temperatura predeterminada en el montón, esquemáticamente representada por un bloque 16, que normalmente está en el orden de 45°C, se distingue la etapa de adicionar el carbono al montón (en la forma de dióxido de carbono) de la etapa de manipulación del calor y se implementa substancialmente e independientemente. Es decir, el caudal de aire no se usa para el control simultáneo de la adición de carbono y para regular la temperatura en el montón. Por encima de esta temperatura, el caudal de aire se controla sobre todo para manipular la temperatura en el montón, es decir, para evitar que la corriente de aire (aunque proporcione el oxígeno adecuado a los microorganismos) enfríe el montón, y se suministra una fuente de carbono adecuada 18, preferiblemente bajo el control de un sistema de control adecuado 20, al montón para suplementar al carbono en el flujo de aire hasta un nivel que sea adecuado para posibilitar que se pueda pasar el intervalo de la baja actividad microbiana.

30 De ese modo, la invención proporciona para la adición dirigida de carbono al montón en el momento específico en el proceso de lixiviación en montón cuando se requiera, es decir cuando el suministro de carbono llegue a ser limitante para el crecimiento microbiano y de ese modo para la oxidación del azufre y para la generación de calor.

35 En el método de la invención es necesario conocer el punto en el cual el proceso de la generación de calor se estanca, es decir en cuál comienza la meseta de la temperatura o el intervalo de la actividad microbiana, referido con respecto a la Figura 2. La columna de simulación de lixiviación en montón descrita en la descripción de la Solicitud de Patente Internacional N° PCT/ZA2004/000025 proporciona un mecanismo para la detección exacta de la capacidad de la generación de calor en un ambiente de lixiviación en montón como una función de las condiciones de la inoculación, la cinética de crecimiento microbiano, la dinámica de la población microbiana y otros factores de operación en el montón relevantes que incluyen el tipo de mineral, la distribución de partícula, la mineralogía y química ácida de la ganga, la composición del mineral del cobre, el contenido de pirita, el caudal de aire, el caudal de irrigación, la química PLS, etc. Los datos derivados de la columna de simulación de lixiviación en montón facilitan la detección exacta del punto en el cual la generación de calor catalizada de forma microbiana llega a ser limitada y así permite la adición dirigida del carbono para superar tales factores limitantes durante la operación de la lixiviación en montón.

45 Además de los datos de la generación de calor proporcionados por la columna de la simulación, también se pueden obtener los datos de consumo del dióxido de carbono si la columna se dota con un equipamiento de control de dióxido de carbono. Los datos experimentales a partir de tales estudios de simulación han mostrado que las disminuciones en las velocidades de consumo del dióxido de carbono coinciden con (o ligeramente preceden a) velocidades que declinan de la generación de calor, de tal modo que proporcionan una prueba adicional de que las velocidades de crecimiento microbiano (indicadas por las velocidades de asimilación del carbono) están relacionadas con las velocidades de la oxidación del azufre (generación de calor). Sin embargo, se debería notar que el control del dióxido de carbono como indicador del crecimiento microbiano es solamente válido en la ausencia de minerales de carbonato en el material mineral y en ausencia de compuestos orgánicos que se utilizan como fuente de carbono por los microorganismos de bio-lixiviación.

50 El carbono adicional se puede añadir bajo la forma de dióxido de carbono, lo más probable suplementado en el sistema de insuflado de aire, o como carbono orgánico tal como un extracto de levadura, lo más probable adicionado en el sistema de irrigación del montón en el momento en el que las velocidades de generación de calor llegan a ser limitantes (lo más probable, y típicamente, debido a la cinética de crecimiento reducida y a la capacidad de fijación de carbono reducida de los microorganismos termófilos moderados en el intervalo 45°C - 60°C).

65 La concentración de dióxido de carbono se podía adicionar en el intervalo de 0,03% - 5% dependiendo de las velocidades de suministro de aire usadas y de las velocidades de consumo del dióxido de carbono por tonelada de mineral. Una fuente de carbono orgánico, tal como extracto de levadura, se podría adicionar en una concentración en el intervalo de 10 - 1000 mg l<sup>-1</sup> dependiendo de las condiciones del montón.

## ES 2 297 686 T3

La adición de la adición de carbono podría ser continuada durante tanto tiempo como fuera necesario pero generalmente sería discontinua cuando se alcanzase una temperatura de 60°C. A esta temperatura, las arqueas termófilas de bio-lixiviación generalmente tienen una elevada capacidad para fijar el dióxido de carbono y es poco probable que requieran carbono además del contenido en el aire, aunque el beneficio de la adición del dióxido de carbono no se excluye enteramente a temperaturas que excedan de 60°C.

Como una alternativa a usar la columna de la simulación para determinar la temperatura en la que existe la meseta de temperatura, la adición de carbono podría comenzar en los intervalos superiores de las temperaturas mesófilas (es decir a aproximadamente 40°C). La adición de carbono en este intervalo de temperaturas en donde la mayoría de las bacterias tienen una elevada habilidad para fijar el carbono sería para compensar el potencial agotamiento del dióxido de carbono suministrado por el flujo de aire al montón. Tal adición de carbono entonces continuaría hasta el intervalo de temperatura termófila. Una ventaja adicional de la adición del carbono a 40°C es que se aumentaría la concentración de células de microorganismos mesófilos. Aunque los microorganismos mesófilos son típicamente y relativamente inactivos a temperaturas por encima de 45°C, estos retienen un bajo nivel de actividad más allá de esta temperatura. Aumentando el número de microorganismos mesófilos, se mejora la actividad microbiana total, y de ese modo la capacidad de generación de calor (vía oxidación del azufre) a temperaturas termófilas moderadas bajas (45°C - 55°C). Los mesófilos proporcionan de ese modo una actividad suplementaria a los verdaderos microorganismos termófilos moderados en este intervalo de temperatura.

Además de la optimización del crecimiento microbiano y de ese modo de la generación de calor vía la suplementación con carbono, también se podrían implementar otros factores que afectan al crecimiento microbiano. Éstos incluyen:

- (a) adiciones de nutrientes según lo conocido en la técnica (típicamente 10 - 50 mg·l<sup>-1</sup>) respectivamente de fosfato y de amonio;
- (b) la eliminación del daño por ácido a un inóculo microbiano al usar ácido durante la inoculación en la aglomeración. Tal daño podría ocurrir en los casos donde el ácido se usa durante la aglomeración en el momento de la inoculación. Si la concentración del ácido usado es demasiado alta en relación al contenido de humedad del material, las células experimentan los efectos del daño ácido que pueden dañar selectivamente a las células que podrían crecer en un intervalo de temperatura concreto y esto afectar a una progresión suave de sucesión microbiana y de generación de calor;
- (c) la eliminación del daño a pH elevado durante las fases iniciales de la puesta en marcha del montón. El pH de la disolución de las operaciones de lixiviación en montón son típicamente y relativamente altos (en el intervalo 2,5 - 4,5) debido a efectos del consumo del ácido de la ganga. Algunas arqueas son particularmente propensas al daño cuando están expuestas a valores de pH por encima de 2 durante prolongados periodos de tiempo. Esto puede provocar un daño selectivo a las células que crecerían en un intervalo de temperatura concreto y de ese modo, también afectaría a la progresión suave de la sucesión microbiana y de la generación de calor; y
- (d) la eliminación de compuestos orgánicos y compuestos inorgánicos inhibidores en la disolución (típicamente refinado) irrigada sobre el montón. Compuestos inorgánicos específicos tales como cloruro, concentraciones totales de sales inorgánicas elevadas (típicamente >120 g l<sup>-1</sup>), o compuestos orgánicos (a muy bajas concentraciones) procedentes de compuestos químicos de extracción con disolventes, pueden provocar efectos de inhibición en los microorganismos de bio-lixiviación y afectar de ese modo de forma adversa su habilidad de generación de calor.

Las ventajas del método de la invención incluyen las siguientes:

- (a) la adición dirigida de carbono es más rentable que la adición no específica de carbono y evita los problemas secundarios asociados con la adición no dirigida de carbono;
- (b) la adición dirigida de carbono aumenta las velocidades del crecimiento microbiano, dando por resultado velocidades de oxidación del azufre aumentadas y de ese modo generación de calor aumentada, particularmente en el intervalo de temperatura 45°C - 60°C;
- (c) la generación de temperatura en un montón es probable que continúe a través y más allá de la típicamente encontrada meseta de temperatura de 50°C, facilitando de ese modo las condiciones conducentes al crecimiento de las arqueas termófilas (con un óptimo de temperatura >60°C); y haciendo que las temperaturas del montón que exceden de 65°C sean fácilmente alcanzables; y
- (d) temperaturas crecientes en el montón que excedan de 50°C dan como resultado una recuperación global mejorada del cobre total y velocidades de recuperación mejoradas, particularmente de la calcopirita en medios de bio-lixiviación en montón.

## ES 2 297 686 T3

La discusión que sigue a continuación trata de la adición de dióxido de carbono o de carbono orgánico como alternativas intercambiables. De modo general, cualquier fuente de carbono adecuada, por ejemplo materiales que contienen carbonato, se pueden usar para suplementar el nivel de carbono en el montón. La adición de carbono orgánico bajo la forma de extracto de levadura, por ejemplo, puede proporcionar ventajas adicionales aparte del carbono y de una mayor solubilidad en agua. Las fuentes de carbono orgánicas de bajo coste tales como el extracto de levadura o las melazas pueden contener vitaminas u otros factores de crecimiento que contribuyan al crecimiento microbiano mejorado más allá de lo que se contribuiría por el carbono contenido en tales fuentes de carbono orgánico.

En una variación de la invención en la que se usa en lugar de o conjuntamente con la adición de carbono para atravesar intervalo de la actividad microbiana reducida, se puede adicionar directamente energía térmica al montón en cualquier forma adecuada. Por ejemplo, una disolución de irrigación aplicada sobre el montón se pueda calentar por sistemas externos. También es posible calentar el flujo de aire que se suministra al montón. Para este propósito también se puede hacer uso del calentamiento solar y, donde sea apropiado, se podría aplicar aislamiento térmico al montón para reducir las pérdidas de calor. Otra posibilidad es hacer uso de cualquiera de las técnicas descritas en la descripción de la Solicitud de Patente Internacional N° PCT/ZA2001/00154 en donde, de modo general, el calor generado en una operación de lixiviación en un tanque se usa para elevar la temperatura de un montón de bio-lixiviación. Esto se realizaría, usando los principios de la presente invención, para posibilitar que se pudiera salvar el intervalo de temperatura en el que ocurre la actividad microbiana reducida.

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un método de operar un proceso de lixiviación en montón de mineral por medio microbiano que incluye la etapa de cambiar al menos un parámetro de operación para elevar la temperatura en el montón cuando el suministro de carbono llega a limitar la actividad microbiana en el intervalo de temperatura de 45°C a 60°C, y de ese modo aumentar la oxidación del azufre y la generación de calor, en el montón.
- 10 2. Un método según la reivindicación 1, en donde al menos un parámetro de operación se cambia por medio de al menos a uno de los siguientes:
- (a) adicionar carbono al montón; y
  - (b) adicionar calor al montón.
- 15 3. Un método según la reivindicación 2, en donde el carbono se adiciona por medio de al menos de uno de los siguientes:
- (a) enriquecer el contenido en dióxido de carbono en una corriente de aire suministrada al montón;
  - 20 (b) adicionar minerales que contienen carbonato al montón; y
  - (c) adicionar carbono orgánico al montón.
- 25 4. Un método según la reivindicación 3, en donde el carbono orgánico es al menos uno de los siguientes:
- (a) melazas; y
  - (b) levadura, o un extracto de levadura.
- 30 5. Un método según la reivindicación 2, en donde el calor se adiciona por medio de al menos de uno de los siguientes:
- (a) calentar una disolución de irrigación que se suministra al montón;
  - 35 (b) calentar el aire que se suministra al montón;
  - (c) calentar con el solar el montón;
  - 40 (d) aplicar un aislamiento térmico al montón para reducir las pérdidas de calor; y
  - (e) adicionar el calor que se genera en una operación de lixiviación en tanque al montón.
- 45 6. Un método según la reivindicación 1, que incluye la etapa de controlar el montón para detectar actividad microbiana reducida y, una vez que ocurre tal detección, de iniciar el cambio en al menos un parámetro de operación.
7. Un método según la reivindicación 1, en donde la etapa de cambiar al menos un parámetro de operación se inicia cuando la temperatura en el montón está por encima de 40°C.
- 50 8. Un método según la reivindicación 1, en donde la limitación del crecimiento microbiano se detecta controlando la evolución del calor en el montón.
9. Un método según la reivindicación 1, en donde la etapa de cambiar al menos un parámetro de operación se inicia a una temperatura que se determina usando una muestra de mineral en una columna de simulación de lixiviación en montón.
- 55 10. Un método según la reivindicación 1, en donde la etapa de cambiar al menos un parámetro de operación se detiene cuando la temperatura en el montón está por encima de 65°C.
- 60 11. Un método según la reivindicación 1, en donde, a una temperatura en el montón que está en el intervalo de 45°C a 60°C, el flujo de aire al montón se controla de modo que el flujo de aire no enfríe el montón y se adiciona carbono al montón para mejorar la actividad de los microbios que funcionan en este intervalo de temperatura.
- 65 12. Un método según la reivindicación 11, en donde a una la temperatura por debajo de 45°C, el caudal de aire al montón se usa simultáneamente para controlar la adición de carbono al montón, y para regular la temperatura del montón.

## ES 2 297 686 T3

13. Un método según la reivindicación 3, en donde el contenido de dióxido de carbono en la corriente de aire suministrada al montón está en el intervalo de 0,03% a 5%.

14. Un método según la reivindicación 3, en donde el carbono orgánico se adiciona en una concentración de 10 - 5 1.000 mg l<sup>-1</sup>.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

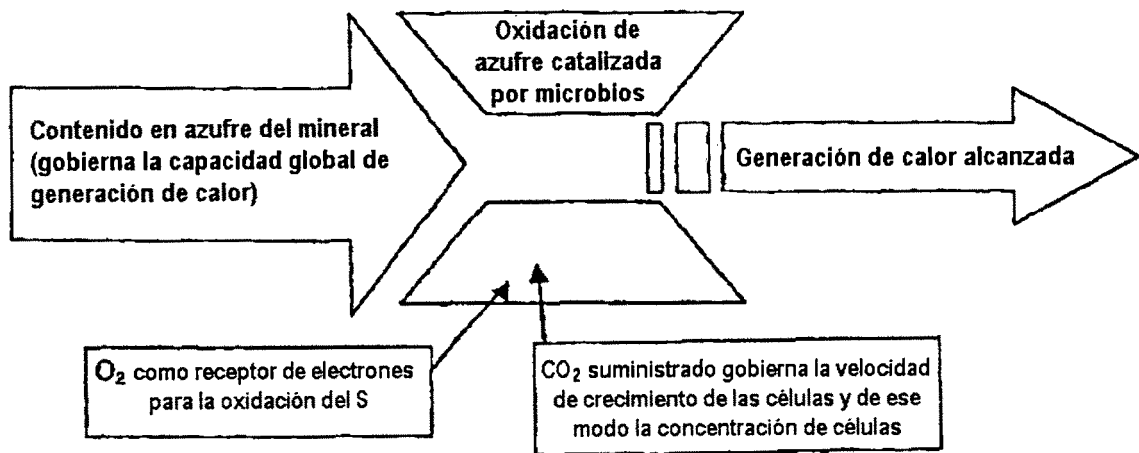


Figura 1

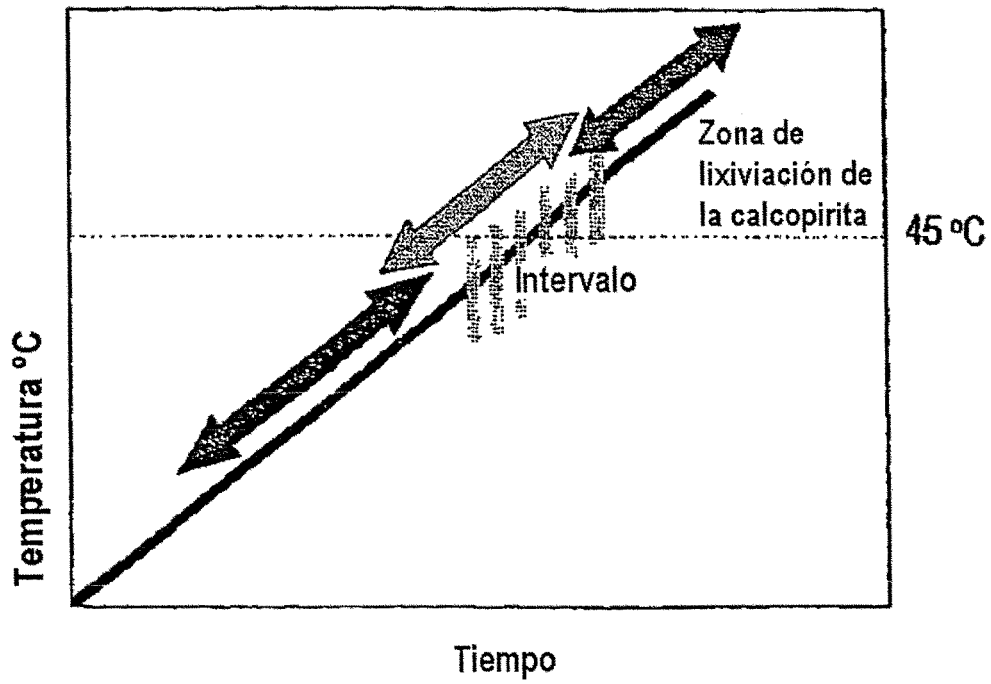


Figura 2

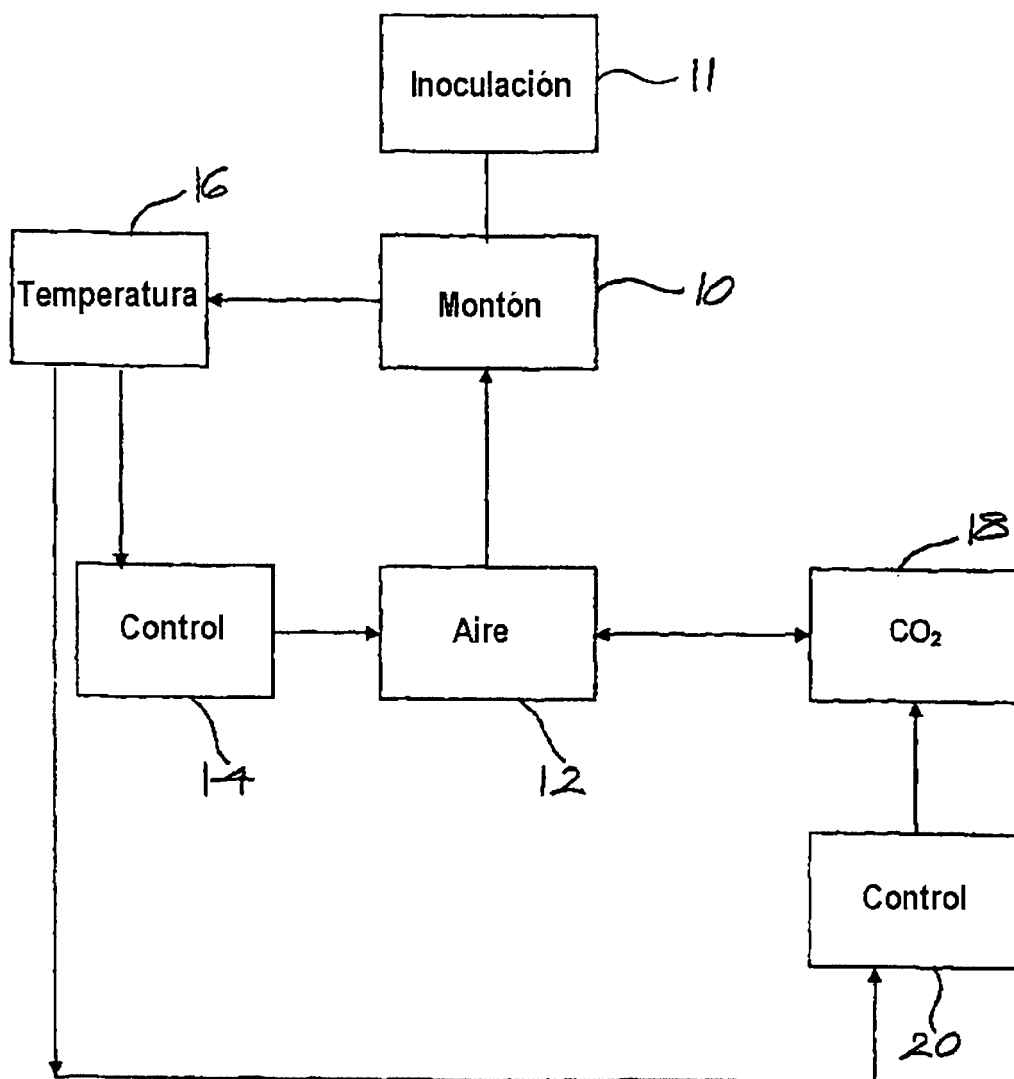


Figura 3