

ORO ECOLOGICO TECNOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DE ORO SIN MERCURIO EN LA MINERÍA DE PEQUEÑA ESCALA

**Carlos Villachica León
Jaime Llamosas Bueno
Leslye Villachica Llamosas
SMALLVILL S.A.C. - CONSULCONT S.A.C.**

Resumen

La obtención de oro por gravimetría y amalgamación es tan antigua como la propia civilización; con el avance de la tecnología la amalgamación ha sido reemplazada en gran parte por procesos de lixiviación con cianuro y en la actualidad menos del 10% de la producción mundial de oro es obtenida mediante métodos que emplean mercurio.

El uso del mercurio está ligado al trabajo de la minería en pequeña escala (MPE), que permite el sustento de un gran número de familias. La Organización Internacional del Trabajo (OIT) y el Global Mercury Project (GMP) estiman que en el Mundo más de 12 millones de personas dependen de la MPE aurífera y usan predominantemente el mercurio para recuperar el oro; como consecuencia esta actividad contamina el ambiente con más de 800 Toneladas/año de mercurio.

La contaminación con mercurio es una gran preocupación mundial desde que en Minamata (Japón) más de un millar de pescadores japoneses y sus familiares murieron intoxicados al ingerir pescado contaminado con este metal. Estados Unidos acaba de dar una Ley que obliga a su industria eléctrica a reducir la emisión de mercurio en un 50%, en los próximos 5 años, de no lograrlo prohibirán que los niños ingieran pescado.

En nuestra Selva, como en otros yacimientos tropicales, la posibilidad de envenenamiento con pescado contaminado con mercurio es alta y creciente, por la abundancia de lavaderos auríferos y la dieta a base de pescado.

Algunos países han prohibido el uso del mercurio mientras que otros han aplicado impuestos altos para desincentivar su uso; el resultado no ha sido otro que encarecer el mercurio 5 veces más y poner en riesgo la sobrevivencia de numerosos pobladores que dependen de la MPE. El pequeño minero continuará con esta opción mientras no se le proporcione otra alternativa tecnológica o económica.

En el trabajo los autores describen el desarrollo de una tecnología, asimilable por la MPE, que recupera el oro sin emplear mercurio en ninguna etapa del proceso. El sistema recupera 20% más que la amalgamación, reduce el tiempo de tratamiento y el esfuerzo humano en 60%, y obtiene oro de mejor calidad.

La tecnología se aplica a las arenas negras o concentrado aurífero y consta de 3 etapas consecutivas: separación magnética de alta intensidad con magnetos permanentes, recuperación gravimétrica rápida del oro grueso y recuperación de oro fino mediante flotación. Los concentrados obtenidos reportan leyes de 40 a 80% de oro que se funden directamente con el soplete; el prototipo desarrollado puede operar manualmente o con un motor de solo 300 vatios.

La aplicación del sistema a operaciones de MPE permitiría obtener "oro ecológico" que alcanza bonificaciones de 5 a 10% en su precio.

Abstract

Gravimetric and amalgamation processing of auriferous gravel is a very ancient activity; technology development has replaced amalgamation by cyanidation and today less than 10% of global gold production is obtained through amalgamation.

Mercury usage is strongly linked to Small Scale Mining (SSM) which in turn provides living to a great number of families. According to International Labor Organization and Global Mercury Project more than 12 million people in the world depend upon gold SSM and use mercury to recover gold; as a consequence they discharge into environment more than 800 Tons of mercury per year.

Mercury contamination is a big global worry since more than thousand fishermen and their relatives were killed in Minamata (Japan) after eating fish contaminated with mercury. Recently United States has established that their electrical industry must cut down 50% of mercury emissions within next 5 years, otherwise the children will not be allowed to eat fish.

In Peruvian jungle, like in other tropical gold placers, there is a growing risk of mercury poisoning due to high gold SSM activity and feeding based on fish.

Some countries have forbidden mercury usage while other have applied high taxes to discourage amalgamation; this has caused a big jump of the mercury price that has affected seriously the living of SSM miners. Even though they will keep using mercury unless they get an alternative way to do so.

The authors describe the technology they have developed to recover gold without using mercury in SSM activity. This technology, which is simple and can be managed by small miners; recovers 20% more than amalgamation, reduces treatment time and physical effort in 60%, and obtains a better gold quality.

Technology is applied to auriferous primary concentrates, also called black sands, and has 3 stages : high intensity magnetic separation using permanent magnets, quick gravimetric recovery of coarse gold and fast flotation recovery of fine gold. The concentrates so obtained reach gold grades as high as 40 to 80% Au, which can be directly smelted with a torch in order to obtain refined gold. The designed prototype can be manually operated or can be powered by a small motor (300 watts).

Applying of proposed technology allow to obtain "ecological" quality gold which in turns can be sold with a 5 to 10% premium.

1.0 INTRODUCCIÓN

La obtención de oro por gravimetría y amalgamación es tan antigua como la propia civilización; con el avance de la tecnología la amalgamación ha sido reemplazada en gran parte por procesos de lixiviación con cianuro tanto en sistemas de agitación como percolación. En la actualidad son comunes las operaciones auríferas que tratan más de 50,000 T/d mediante cianuración, pudiendo afirmarse que menos del 10% de la producción mundial de oro es obtenida mediante métodos que emplean mercurio.

No obstante, el uso del mercurio está ligado al trabajo de la minería en pequeña escala (MPE), o lo que algunos denominan “oro de los pobres” u “oro solidario” porque permite el sustento de un gran número de familias en el país y en el Mundo. La Organización Internacional del Trabajo (OIT) y el Global Mercury Project (GMP) estiman que en el Mundo más de 12 millones de personas dependen de la MPE aurífera y usan predominantemente el mercurio para recuperar el oro; como consecuencia esta actividad vierte más de 800 Toneladas/año de mercurio al ambiente.

La contaminación con mercurio ha pasado a ser una gran preocupación mundial desde la tragedia que en Minamata (Japón) mató a más un millar de pescadores japoneses; ya se hace invierten sumas importantes en programas para controlar o evitar su uso, aunque en nuestro país no se le ha dado la misma importancia. Estados Unidos acaba de dar una Ley que obliga a su industria de generación eléctrica a reducir las emisiones de mercurio en un 50%, las consecuencias de no lograrlo conducirían a medidas tan drásticas como prohibir que los niños ingieran pescado.

En nuestra Selva, como en otros yacimientos tropicales, la posibilidad de envenenamiento con pescado contaminado con mercurio es alta y creciente, por la abundancia de lavaderos auríferos y la dieta basada en este recurso; por otro lado la contaminación no es un problema local y los ríos y vientos la extienden grandes distancias.

Algunos países ya han prohibido el uso del mercurio mientras que otros han aplicado impuestos altos para desincentivar su uso; el resultado no ha sido otro que encarecer 5 veces el mercurio apremiando a la MPE. Es evidente que el pequeño minero continuará con esta opción mientras no cuente con una alternativa tecnológica y económicamente más eficiente, hay que recordar que la supervivencia familiar de la MPE se basa en la actividad minera artesanal.

Los autores han desarrollado una tecnología simple, eficiente, económica y asimilable a la MPE, que recupera el oro sin emplear mercurio en ninguna etapa del proceso. El sistema recupera 20% más que la amalgamación, reduce el tiempo de tratamiento en un 60% y obtiene un oro de mejor calidad reduciendo también el esfuerzo humano.

La tecnología se aplica a las arenas negras o concentrado aurífero y consta de 3 etapas consecutivas: separación magnética de alta intensidad con magnetos permanentes, recuperación gravimétrica rápida y flotación por espuma. Los concentrados obtenidos reportan leyes de 40 a 80% de oro que se funden directamente con un soplete; el prototipo construido puede operar manualmente o con un motor de solo 300 vatios.

La aplicación del sistema a operaciones de MPE permitiría obtener “oro ecológico” que alcanza bonificaciones de 5 a 10% en su precio.

2.0 PRACTICA ACTUAL

No obstante que el hombre ha empleado la amalgamación durante más de 2 milenios la gravedad de la contaminación con mercurio es un hecho poco conocido y difundido aún en nuestros días; una razón probable es que muchos de sus efectos se detectan recién en el largo plazo. La degradación del mercurio hacia metilmercurio, un compuesto venenoso y mutante, ocurre naturalmente a través del sistema nervioso de los peces que lo ingieren y por el contacto con suelos orgánicos, de allí la importancia de evitar su uso en las operaciones aluviales que se realizan en la Selva. La tragedia de Minamata en Japón, donde en 1950 la intoxicación con metilmercurio mató progresivamente a más de 1200 pescadores¹, ha sentado el precedente sobre la gravedad esta degradación.

El uso del mercurio ha sido prácticamente desterrado de las operaciones mineras de la Mediana y Gran Minería, pero todas las operaciones auríferas de la MPE lo utilizan en el Perú y en el resto del Mundo; en nuestro país las operaciones artesanales se desarrollan en Costa, Sierra y Selva. Organismos oficiales estiman que se vierten al medio ambiente más de 3 veces el peso del oro producido por esta actividad, esto lleva a la contaminación con mercurio en la Selva Peruana a un nivel tan alto como 30,000 kgs/año.

Se estima que en la Selva Peruana hay más de 2,000 operaciones mineras aluviales de MPE las

cuales se encuentran muy dispersas y en algunos casos muy alejados de centros poblados; el “modus operandi” consiste en realizar faenas durante horas del día para culminar con la amalgamación y refogado en las últimas horas de la tarde; en zonas relativamente cercanas a poblados menores los líderes del Grupo y algunos trabajadores retornan diariamente al pueblo, mientras que el resto pernocta en el yacimiento. Los trabajadores suelen ir al pueblo semanalmente para comercializar el oro obtenido y adquirir víveres e insumos (gasolina, petróleo, lubricante, mercurio, etc.) para continuar la operación. En lugares muy distantes todo el Grupo retorna al pueblo con una frecuencia semanal.

El lugar usual de comercialización son los poblados mencionados; en otros casos solo venden parte de la producción de oro “refogado” y el resto se vende en ciudades mas grandes para conseguir mejor precio. El concentrado aurífero primario no se vende directamente porque su contenido de oro es muy variable, el análisis químico costoso y lento, y el transporte difícil, tampoco existen instalaciones en poblados cercanos, o aún ciudades mas grandes, donde procesar este tipo de material.

Las operaciones que realizan los mineros de MPE son bastante simples; se arranca el material de tierra firme empleando lampas y picos o chorros de agua generados por bombas centrífugas accionadas por motores diesel o a gasolina. En el caso de extraer material del lecho del río se emplean dragas de succión accionadas por bombas de lodos (ver fotos 1, 2, 3 y 4). En todos los casos el material se conduce en forma de pulpa hasta unas parrillas metálicas que eliminan los cantos mientras que la pulpa de grava fina se descarga sobre una canaleta, usualmente de madera, donde el oro y minerales pesados sedimentan rápidamente y son retenidos a lo largo de su base mientras que los materiales livianos son arrastrados por el torrente de la pulpa y se descargan por el extremo de la canaleta. La base interna de la canaleta esta forrada con tela de yute o geotextil para promover la retención de los minerales pesados y del oro; al final de la faena se detiene la alimentación y se retira la tela de yute que tiene el concentrado gravimétrico primario (denominado también “arenilla negra”), el mismo que se descarga en un balde o batea.

En la MPE la cantidad de concentrado gravimétrico primario obtenido diariamente oscila entre 50 y 90 Kgs; la amalgamación se realiza añadiendo de 2 a 4 kgs de mercurio a la batea y revolviendo la carga intensamente con manos y/o los pies. Luego se aplican chorros de agua para eliminar por rebose el

material no amalgamado y dejar la amalgama de oro y mercurio libre en el fondo del recipiente. El mercurio libre se recupera por decantación y la amalgama, que aún contiene un exceso de mercurio libre, se exprime a través de una tela para recuperarlo. La amalgama exprimida se calienta con un soplete hasta volatilizar el mercurio presente y dejar el oro como un sólido esponjoso (“oro refogado”).



Foto 1. Operación aurífera artesanal en la Selva, método de Carretilla



Foto 2. Operación aurífera artesanal en la Selva, método de Carranchera (Bomba en playa)



Foto .3 Operación aurífera artesanal en la Selva, método de Chupadera (Monitores y bombas)



Foto 4. Operación aurífera artesanal en la Selva, método de Balsa (Succión y bombeo)

El oro obtenido se pesa en una balanza portátil y se divide en partes proporcionales para distribuirla entre los miembros del Grupo de trabajo. El ciclo descrito se repite diariamente.

Las razones por las cuales la MPE usa y prefiere el mercurio frente a otras alternativas propuestas anteriormente, son las siguientes :

- El oro recuperado de yacimientos aluviales está predominantemente en el estado libre.
- La amalgamación es un proceso rápido y aceptablemente eficiente para minerales donde el oro se encuentra en estado libre.
- La amalgamación permite obtener un producto final de alta ley de oro, usualmente de 80 a 95% de oro*, lo cual facilita su inmediata comercialización sin los grandes descuentos que se aplican a productos mineros como concentrados.
- El tratamiento es simple, no requiere mucho conocimiento técnico ni equipo sofisticado o costoso; por ello la amalgamación se aplica en el mismo lugar donde se obtiene el concentrado gravimétrico primario, es decir en los sitios remotos y aislados de la Selva Peruana.
- El tratamiento es relativamente rápido, aunque requiere una mezcla intensiva y lavado repetido durante 2 horas para que el minero obtenga el oro "refogado"..
- Los otros minerales presentes en el concentrado gravimétrico primario no

* Esta ley corresponde a operaciones en Madre de Dios o Ananea (Puno), pero en realidad la ley final depende de la pureza de oro en el yacimiento; en lugares con alto contenido de plata la ley del oro refogado oscila entre 70 y 80% (18 a 20 quilates)

consumen mercurio ni se combinan con él permitiendo obtener un producto de buena calidad con pérdidas económicamente aceptables de mercurio.

- Fácil transporte del producto, al obtener el oro por amalgamación el peso respecto al concentrado gravimétrico se reduce de decenas de kilos a gramos facilitando su transporte desde lugares remotos al sitio de su comercialización.
- La obtención del oro semirrefinado en el mismo lugar de la operación permite su distribución inmediata entre socios y trabajadores; de este modo se reduce la dependencia y se agiliza la rotación del recurso y del ciclo productivo.
- El mercurio es un reactivo disponible en el mercado, de libre y fácil comercialización. El transporte de las cantidades requeridas a sitios remotos no presenta dificultades, ni está sujeta (aún) a controles sanitarios, ambientales, fiscales o de otro tipo.

No obstante las ventajas mencionadas hay desventajas tan importantes como las siguientes :

- Es un material altamente tóxico y contaminante; en el proceso de amalgamación se produce la contaminación del suelo y agua cuando se deshecha el relave de este proceso. Cuando se volatiliza (refoga) la amalgama para separar el mercurio del oro, se contamina el aire; durante el refogado complementario de la comercialización se genera contaminación en lugares poblados.
- Si bien hay sistemas para el control y captura del mercurio volatilizado, estos (Retortas) no son eficientes ni prácticos en todos los casos y muchos mineros artesanales, especialmente en zonas remotas, no los utilizan. Por otro lado estos sistemas no evitan la contaminación directa del suelo y agua por el relave de amalgamación que contiene mercurio.
- La amalgamación no es considerada una tecnología limpia en ningún caso, en las condiciones empleadas en la MPE esta técnica es considerada altamente contaminante y afecta la calificación de los mineros frente a organismos crediticios o gubernamentales. Por ejemplo el uso de cianuro no ha sido, a diferencia del mercurio, prohibido en ningún país no obstante su reputada toxicidad.

- La generalidad de los mineros realiza la amalgamación en forma manual porque los equipos que requiere la mecanización son caros e imprácticos para esta escala de producción. Por ello el grado de exposición y riesgo de salud es sumamente alto.
- Tiempo de amalgamación prolongado, 1.5 a 2 horas, en el cual por razones de desconfianza intervienen todos los miembros del Grupo, representa una pérdida importante de tiempo útil y mano de obra, reduciendo la productividad en más del 20%.
- El sistema no permite recuperar otros valores importantes como rutilo y zirconio, presentes en el concentrado gravimétrico primario.
- El mercurio que requiere la amalgamación es un costo que afecta la rentabilidad de la MPE, especialmente en aquellos casos donde su consumo es alto y en las circunstancias actuales, y futuras, en que la restricción internacional ha elevado su precio de 8 a 40 US\$/Kg.

3.0 DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA PROPUESTA*

3.1 Características Relevantes del Concentrado Aurífero Primario y de los Procesos de Concentración

La ley típica del concentrado gravimétrico primario está en el orden de 400 a 1,000 gr.Au/T, lo cual en el mejor de los casos significa que solo contiene 0.1% de oro y el resto, 99.9%, lo conforman minerales con un valor mucho menor que el oro. Como el oro se encuentra en estado libre, su separación completa del resto de minerales es físicamente posible y el valor del producto obtenido dependerá de la proporción de mineral que logre separarse del oro; el proceso o procesos adecuados para este propósito dependen de las propiedades del oro y resto de minerales.

Se ha determinado que los minerales presentes en el concentrado gravimétrico primario de la Selva Peruana son, en orden de abundancia, los siguientes : Magnetita, Hematita, Ilmenita, Granate, Epidota, Circón, Rutilo, Leucoxeno, Monacita, Cuarzo, y oro entre otros.

Una característica importante es que de todos ellos solo el oro es un metal y junto con el Rutilo,

Magnetita e Ilmenita, son buenos conductores de electricidad; el resto de minerales no lo son, por lo tanto su separación empleando la técnica de Separación Electroestática es factible.

Se ha determinado también que todos los minerales pesados mencionados son magnéticos y paramagnéticos a excepción del cuarzo, rutilo, circón y oro, y pueden entonces separarse de este último grupo si se emplean magnetos de alta intensidad.

Por otro lado, se ha determinado que todos los minerales pesados mencionados son óxidos, silicatos o en general especies oxidadas que no adsorben los colectores normalmente empleados en la flotación por espuma de sulfuros, tales como xantatos y ditiosfosfatos. Este tipo de colectores si se adsorben sobre la superficie del oro, y entonces puede separarse de todo el grupo si se emplea la técnica de flotación; solo el oro de granulometría gruesa es difícil recuperar por flotación pues su elevado peso limita su colección y transporte por las burbujas de aire.

Es posible incrementar notablemente la ley de oro del concentrado gravimétrico primario si se aplica una etapa adicional de concentración gravimétrica, independientemente del tipo de equipo que se emplee. En este caso se recupera principalmente el oro de granulometría gruesa mientras que el oro fino se pierde en el relave de esta etapa; las pérdidas son mayores cuando el tiempo de tratamiento se reduce para hacerlo atractivo a la MPE. Entonces es necesario complementar esta operación gravimétrica rápida con otra igualmente rápida y simple que recupere el oro de granulometría fina en el lugar, o por un sistema de tratamiento y comercialización que complemente el esfuerzo inicial del minero artesanal. Ambos sistemas forman parte de la tecnología propuesta.

El concentrado enriquecido con cualquiera de las técnicas mencionadas, que no emplean mercurio, alcanzaría leyes entre 4,000 y 25,000 gr.Au/T, que ya justifican su fundición directa para obtener oro semirrefinado. La rentabilidad en esta etapa será mayor cuanto mayor sea la ley de oro, pero la rentabilidad global depende también de la recuperación y del costo de cada etapa del sistema.

Se han evaluado varios sistemas de tratamiento que permiten procesar el concentrado gravimétrico primario "in situ", con equipo simple, de bajo costo y sin emplear mercurio, obteniendo concentrados enriquecidos con leyes suficientemente altas para justificar la fundición directa. Asimismo se han evaluado métodos similares complementados con técnicas de disolución rápida del oro, los cuales si

* La técnica descrita sigue su trámite de patente en INDECOPI (Certificado N° 001223-2004/OIN)

bien constituyen procesos complicados para la MPE, pueden ser asumidos por entidades o empresas de terceros en calidad de prestación de servicios. A continuación se describen estos sistemas.

3.2 Concentración Magnética de Alta Intensidad con Imanes Permanentes

La separación magnética de alta intensidad para recuperar industrialmente minerales pesados paramagnéticos tales como Ilmenita, Monacita, Rutilo y Circón, emplea equipos de alta capacidad (miles de toneladas por día) con electroimanes que requieren una fuente externa de energía. En este caso los productos magnéticos y paramagnéticos se recuperan separadamente para su posterior purificación y comercialización.

En nuestro caso todos los productos magnéticos y paramagnéticos constituyen relaves o materiales de poco o ningún valor, y el objeto es eliminar tanto como se pueda de ellos para dejar al oro con la mínima cantidad de minerales y obtener un concentrado enriquecido de alta ley, que justifica su transporte y/o tratamiento posterior en un lugar con mayor infraestructura. Para compatibilizar esta técnica con la pequeña escala y ubicación remota de las operaciones de MPE, se utilizó magnetos permanentes de alta intensidad que hoy existen en el mercado y se utilizan para otro objeto. Esto reduce significativamente la inversión requerida para su aplicación.

Las pruebas que hemos realizado empleando magnetos de tierras raras (neodimio) permitieron eliminar el 85% del peso original del concentrado gravimétrico primario y reducir el peso del producto aurífero (no magnético) a solo 15%; el balance metalúrgico e incremento de la ley de oro alcanzado se muestra en las figuras 1 y 2 y los productos obtenidos se presentan en la foto 5.

El primer beneficio que el MPE obtiene, es reducir 85% del peso de concentrado (digamos de 80 a 12 kgs) que diariamente tendría que transportar hasta el poblado donde se cuenta con infraestructura para procesar o comercializa este producto.

El concentrado enriquecido puede ser procesado mucho mas fácilmente con cualquiera de las técnicas complementarias descritas en la sección siguiente. Asimismo el producto podrá ser comercializado directamente a terceros que cuenten con la infraestructura para este procesamiento adicional, gracias a que este concentrado puede ser analizado rápidamente y con bajos costo para el MPE; mas adelante se

describen las técnicas de análisis químico rápido que emplean disolución del oro.

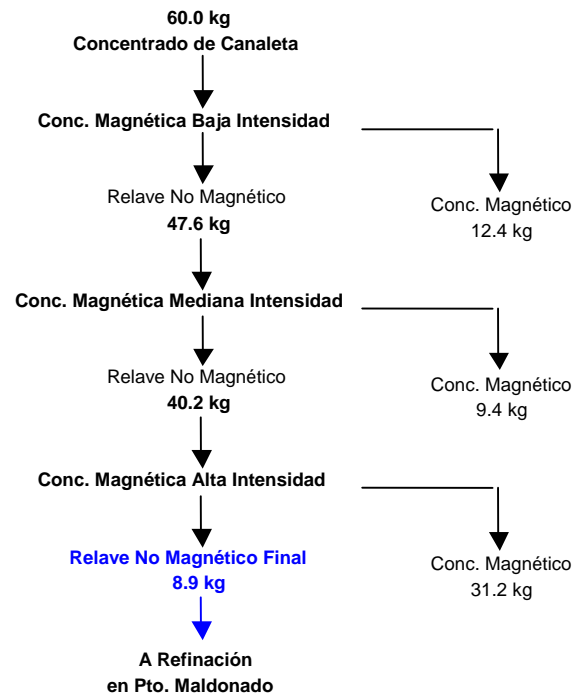


Figura 1. Diagrama de flujo de la concentración magnética de alta intensidad del concentrado gravimétrico primario.

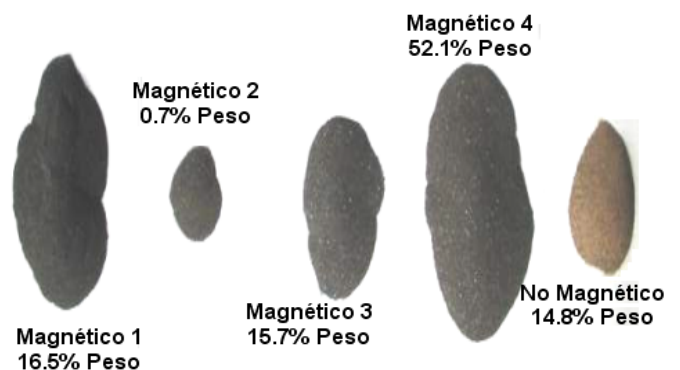


Foto 5. Productos obtenidos en la concentración magnética de alta intensidad del concentrado gravimétrico primario

El procesamiento magnético propuesto puede ser aplicado en forma manual por la MPE, con equipos simples y de bajo costo; esta inversión moderada permitiría que el MPE de el gran salto tecnológico y ambiental que significa obtener oro semirrefinado o refinado sin emplear mercurio.

Una ventaja del traslado del concentrado enriquecido a una población es que esta cuenta con fuentes de energía permanentes, local apropiado y apoyo logístico y técnico para el tratamiento complementario. También se puede comercializar allí el concentrado u oro semirrefinado obtenido, o contratar el servicio de terceros para la etapa final del proceso.

Las alternativas para el tratamiento complementario se describen a continuación.

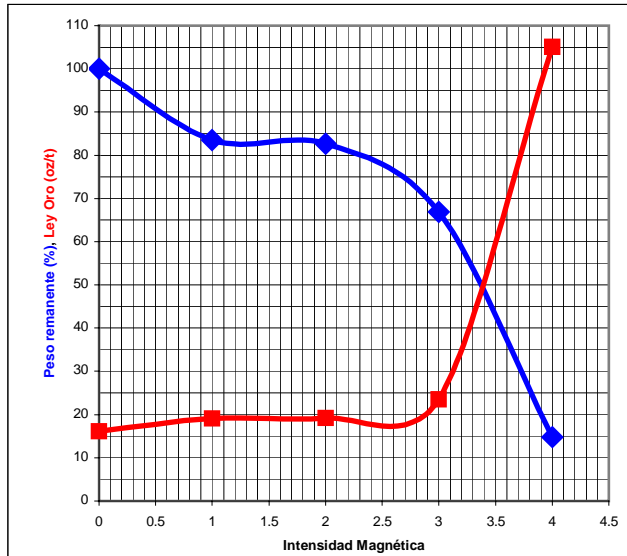


Figura 2. Pérdida de peso e incremento de la ley de oro en el producto no magnético. Concentración magnética de alta intensidad del concentrado gravimétrico primario.

3.2.1 Lixiviación Directa del Concentrado Enriquecido

El oro presente en el concentrado enriquecido se encuentra en estado libre, es decir en partículas individuales que no están asociada a otros minerales, y estos son en su mayoría silicatos y óxidos que no reaccionan con compuestos como cianuro, tiourea, tiosulfato, iodo o agua regia, que en cambio disuelven el oro (ver fotos 6 y 7). El oro presente puede ser disuelto sin interferencia y con bajo consumo de estos lixiviantes además que se puede aplicar condiciones más enérgicas (presión de oxígeno, oxidantes, temperatura, agitación y molienda intensiva, etc.) si fuera necesario acelerar su disolución.

El carácter granular del producto permite también una separación sólido/líquido eficiente, facilita el lavado del residuo, la recirculación del solvente y control de la contaminación. Los sistemas

considerados en esta etapa se describen a continuación.



Foto 6. Vista del producto no magnético obtenido en la concentración de alta intensidad del concentrado gravimétrico primario; se observa alto contenido de circón.



Foto 7. Vista del producto no magnético de la foto 6, luego de una rápida concentración magnética manual (en el plato) se observa alto contenido de oro libre de granulometría gruesa.

5.2.1.a Disolución con Agua Regia

La novedad de la utilización del agua regia es su aplicación comercial a un concentrado aurífero pues su uso ha estado limitado a productos semirefinados. La concentración magnética previa ha separado los minerales, principalmente ferruginosos y titaníferos, que consumen agua regia

y ácidos en general; de otro modo la disolución sería inaplicable con un reactivo poco selectivo como es el agua regia. Por ejemplo el rutilo y circón presentes en el concentrado enriquecido no se disuelven en agua regia, aunque el primero si lo hace en otros ácidos.

Por otro lado al reducirse 6 veces el peso del concentrado se reduce en la misma proporción las dimensiones, y costo, de tanques reactores e infraestructura necesaria para el tratamiento (calentadores, sistemas de ventilación y tratamiento de gases, etc.); cabe señalar que estos tanques deben ser construidos de cerámica, plásticos o vidrios especiales en vista de la alta corrosividad del agua regia.

La disolución del oro toma menos de 20 minutos, en condiciones apropiadas de concentración y temperatura y el agua regia no tiene las limitaciones cinéticas de otros reactivos para disolver el oro grueso. Esto reduce notablemente el tiempo de espera y observación del MPE en el caso de procesarse en instalaciones de terceros. Una vez disuelto el oro, se pesa todo el tanque reactor y por diferencia se establece el volumen de la solución; se toma un pequeño volumen de muestras de la solución y se analiza directamente por colorimetría u espectrometría de absorción atómica (EAA), en el mismo establecimiento. Este análisis toma menos de 3 minutos al cabo del cual el MPE puede determinar la cantidad de oro que tenía su concentrado enriquecido; el conservará la muestra duplicada de solución para analizarlo en otro Laboratorio si fuera el caso. Conocido el resultado el MPE recibe el pago correspondiente del administrador del establecimiento descrito.

El sistema descrito se realiza en presencia del MPE, tomando solo 30 minutos de su tiempo frente a las 2 horas de tiempo y esfuerzo que implica la alternativa de amalgamación. Además la recuperación obtenida es mayor, el precio mas alto, no gasta en comprar mercurio, y no tiene necesidad de refinar el oro para obtener buenas condiciones de venta. En el establecimiento las soluciones auríferas de varios lotes se unen y se procesan en conjunto para obtener el oro refinado; ello reduce notablemente el costo de refinación que de otro modo se reflejaría en un mayor descuento al MPE. Asimismo el costo del análisis químico directo es bajo y no afecta su economía.

El establecimiento brindaría servicio a un gran número de MPE gracia a la rapidez y simplicidad del sistema propuesto. Al unificar el tratamiento final en un lugar apropiado se respalda la instalación de sistemas de control que evitan la contaminación líquida, sólida o gaseosa; por el

contrario su aplicación en forma individual es económica y ambientalmente inviable.

Para reducir la dificultad y riesgo de trasladar hasta poblados de la Selva reactivos tan corrosivos, y tóxicos, como HCl y HNO₃, se ha considerado recuperar por electrólisis el oro disuelto y lograr así un alto reciclaje del HCl; para el caso de una alta demanda se transportará NaCl sólido y se generará el HCl en el establecimiento mismo. El NO generado en la disolución es un gas tóxico que será convertido a N₂O mediante una corriente oxidante de O₂; si bien este gas es inocuo, será ser absorbido en lechada de cal. El HNO₃ será generado en el lugar a partir de nitrato de sodio (NaNO₃) que es un material sólido no tóxico fácil de transportar. Los autores también han empleado anteriormente el sistema MnO₂-HCl, para generar cloro naciente y disolver el oro² la pirolusita (MnO₂), es un oxidante muy fuerte no tóxico que abunda en el país y en áreas cercanas (Puno) a la Selva Peruana.

3.2.1.b Disolución con Cianuro de Sodio

La disolución del oro con cianuro de sodio se emplea ampliamente en la minería convencional, pero no ha sido aplicada a concentrados auríferos procedentes de operaciones aluviales de MPE. En nuestro caso su aplicación es facilitada notablemente por la concentración magnética previa. El sistema aplicado se realiza en un establecimiento similar al descrito en la sección 3.1.1.a. Para que el MPE pueda conocer en corto tiempo la ley de su concentrado y comercializarlo ventajosamente; se realiza la disolución rápida con agua regia de una muestra representativa y se determina su concentración por EAA o Colorimetría.

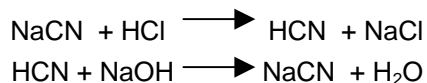
La cianuración demora en disolver el oro grueso y ello resta rentabilidad al método; en vista de ello el concentrado enriquecido se somete a concentración gravimétrica rápida para recuperar la totalidad del oro grueso (Foto 7) y parte del oro de granulometría fina. El concentrado, obtenido en pocos minutos, alcanza una ley muy alta (mayor que 70%Au) que justifica su fusión directa para obtener oro semirrefinado y comercializarlo inmediatamente; el relave gravimétrico que contiene oro de granulometría fina se somete a cianuración en condiciones enérgicas (alta concentración de cianuro y oxígeno, alta velocidad de agitación y temperatura). En esas condiciones el 90% del oro se disuelve en menos de 1 hora y las soluciones de varios lotes de concentrado enriquecido se unen después de separar los sólidos; el oro se recupera por electrodeposición

mientras que la solución gastada se traslada a la etapa de disolución lenta. El residuo sólido de varios lotes se reúne también para continuar una disolución lenta (12 horas) en un tanque de mayores dimensiones; la solución obtenida aquí, que tiene una concentración relativamente baja de oro se recircula al circuito de disolución rápida.

El MPE puede comercializar su concentrado enriquecido después de un análisis rápido o puede intervenir en parte de su procesamiento; puede obtener un lingote a partir del oro grueso y comercializar el relave de oro fino en base al análisis químico; o puede esperar a que este se cianure y obtener el oro físico. Esta diversidad de opciones contribuirá a que el MPE adquiera confianza y conocimiento mientras se procesa su concentrado enriquecido y facilita la aceptación de una nueva metodología que no emplea mercurio.

Su utilización en un solo lugar antes que en numerosas operaciones dispersas en la Selva, reduce notablemente el riesgo de contaminación de un reactivo tan tóxico como el cianuro; cabe recordar que existe amplia experiencia en su manejo y un excelente récord de buen uso con personal e instalaciones apropiadas.

Para minimizar el riesgo de traslado hasta poblados de la Selva se ha considerado recuperar el cianuro de las soluciones recirculadas mediante la generación de HCN :



La desventaja del método INCO que emplea H_2SO_4 para generar HCN, es el difícil y riesgoso transporte de este ácido. El HCl y NaOH necesarios en nuestro caso se obtienen por electrólisis a partir de la sal común (NaCl); la sal común se traslada sin problemas además que existen yacimientos de este tipo en la Selva.

3.2.1.c Disolución con otros reactivos

La disolución del oro presente en el concentrado enriquecido con otros reactivos no tóxicos tales como tiourea, tiosulfato y yodo se encuentra, en nuestro caso, en la fase experimental pero existe amplia información³⁻⁶ de su exitosa aplicación a sistemas mas complejos que el nuestro. Todos ellos tiene el denominador común de no ser tóxicos y una alta cinética, y su aplicación al sistema propuesto es simple gracias a que la concentración magnética previa ha eliminado la mayor parte de los minerales metálicos que interfieren con su acción y reducido notablemente el peso de material por procesar.

3.2.2 Fundición directa

El concentrado enriquecido puede ser fundido directamente para obtener oro refinado, gracias al alto valor unitario obtenido por la concentración magnética previa. Para ello se selecciona los fundentes apropiados que representan el costo principal junto con la energía necesaria para la fundición.

Se encuentra en evaluación la fundición directa selectiva que aprovecha la notable diferencia entre los puntos de fusión del oro (1093°C), Circón (2,550 °C), Rutilo (1,840 °C) y aún el cuarzo (1,650°), presentes en este material.

3.2.3 Fundición Combinada con Concentración Gravimétrica y Flotación por Espuma

Esta alternativa reduce el costo de insumos y energía en la fundición final. La concentración gravimétrica rápida del concentrado enriquecido recupera el oro grueso en un producto de muy alta ley (foto 7) que se funde directamente para obtener oro semirrefinado; se utiliza equipo simple, pequeño y de bajo costo de operación/inversión tal como una pequeña mesa vibratoria (foto 8), pues el oro fino será recuperado con un proceso complementario. La mesa vibratoria procesa el concentrado enriquecido en menos de 5 minutos.



Foto 8. Vista de una mesa vibratoria para la concentración gravimétrica rápida del oro libre de granulometría gruesa. El tamaño del equipo necesario es mucho menor en nuestro caso.

El relave de la mesa vibratoria se trata mediante flotación (Foto 9), empleando equipo y reactivos convencionales como Xantatos y/o ditiofosfatos, y MBIC como espumante. Las burbujas generadas colectan mas del 90% del oro fino en solo 15 minutos de flotación (foto 9). El concentrado de flotación se decanta para eliminar el exceso de agua, se filtra, seca y se funde para obtener oro semirrefinado.



Foto 9. Vista de una celda de flotación de laboratorio para la recuperación rápida del oro libre de granulometría fina. El tamaño del equipo necesario es similar en nuestro caso.



Foto 10. Vista del concentrado de oro fino obtenido mediante la flotación convencional del concentrado enriquecido magnéticamente.

La integración del proceso gravimétrico y flotación para recuperar oro grueso y fino, respectivamente, reduce notablemente el costo de inversión y operación de todo el sistema, reduce el tiempo de tratamiento y simplifica el sistema.

Para procesar "in situ" el concentrado gravimétrico primario y concentrado enriquecido, se está desarrollando mesas vibratorias y celdas de flotación muy livianas y de pequeño tamaño, que

pueden ser accionadas con una pequeña fuente de energía o manualmente. Ello permitirá obtener concentrados con leyes suficientemente altas para la fundición directa, también "in situ".

Se está perfeccionando los sistemas mostrados en las figuras 3 y 4, para operar sin una fuente externa de energía; la mesa vibratoria es accionada mediante una excéntrica de pedal impulsada por el MPE; la alta frecuencia de oscilación se obtiene mediante un juego de poleas; nuevamente, el alto rendimiento no es una limitación en este sistema gracias al proceso complementario de flotación.

También hay que señalar que el minero tiene la destreza suficiente para realizar esta concentración con una batea convencional, dado que el peso se ha reducido notablemente (Fotos 6 y 7).

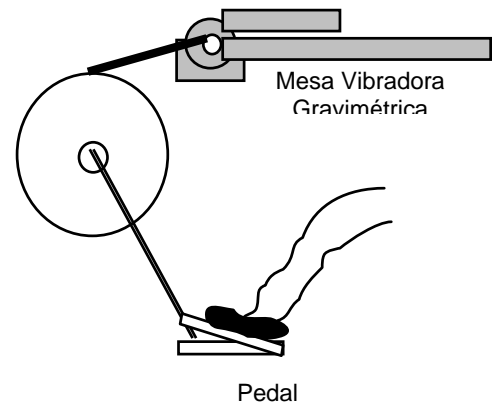


Figura 3. Representación esquemática de la Mesa gravimétrica vibratoria accionada por el minero, para la recuperación rápida del oro grueso del concentrado enriquecido.

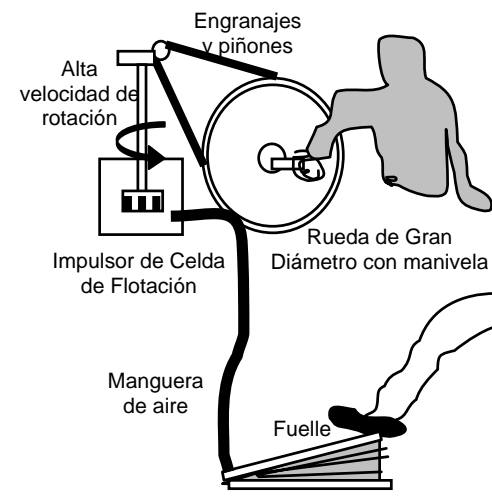


Figura 4. Representación esquemática de la Celda de Flotación accionada por el minero, para la recuperación rápida del oro fino del concentrado enriquecido.

En la celda de flotación la agitación radial se logra mediante el giro manual de una volante que comunica un giro perpendicular al eje de la celda y una mucho mayor velocidad mediante un juego de engranajes (figura 4); el aire necesario para generar las burbujas se insufla desde un fuelle accionado por el pie del operador.

Otra alternativa que se propone en la invención en desarrollo es una columna de flotación de pequeña dimensión (3 a 4 pulgadas de diámetro) donde el mecanismo de generación de burbujas es un filtro o placa porosa de material cerámico o plástico. El aire se insufla empleando un fuelle. Este equipo tiene la ventaja de no tener partes móviles (figura 5) y puede operar eficientemente tanto para oro grueso como para oro fino aunque requerirá una alimentación dosificada del concentrado enriquecido.

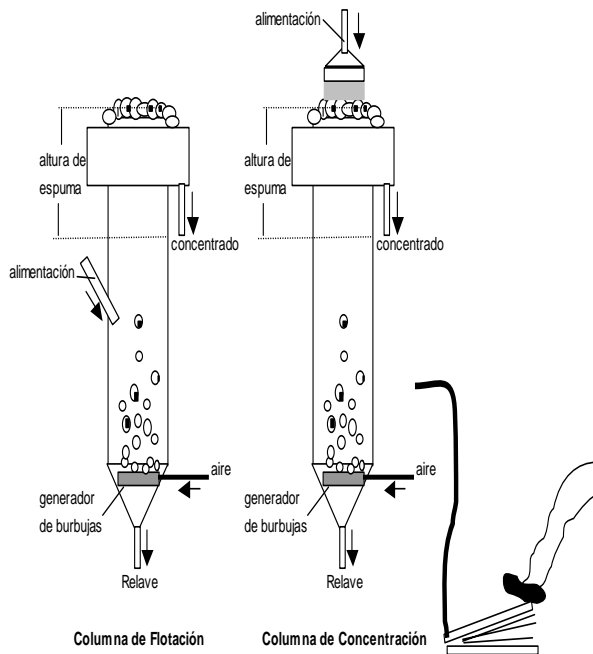


Figura 5. Representación esquemática de la Columna de Concentración para la recuperación de partículas hidrofóbicas gruesas, y de la Columna de Flotación Convencional para partículas finas

3.2.4 Fundición Combinada con Separación Electroestática

Otra alternativa para reducir el costo de insumos y energía en la fundición que la tecnología propuesta contempla consiste en tratar el concentrado enriquecido en un Separador Electroestático portátil, el mismo que concentrará más aún el oro al eliminar el circón (ver foto 6 y 7). Se estima que ello reducirá 15 veces el peso final del concentrado

enriquecido con respecto al peso del concentrado gravimétrico primario.

Para la unidad portátil se considera utilizar baterías con elevadores de voltaje. El Separador Electroestático instalado en un poblado, emplearía una fuente domiciliaria de energía eléctrica; en ambos casos este tipo de separación, usualmente costosa, es económica y físicamente factible gracias a que la concentración magnética previa ha eliminado la mayor parte de los minerales metálicos y reducido notablemente el peso de material por procesar.

3.3 Recuperación de Metales Pesados junto con el Oro

En el producto no magnético que recupera la mayor parte del oro, se recupera también los minerales pesados mas valiosos presentes en el concentrado original. Estos son Rutilo y Circón, y podrían ser procesados posteriormente para obtener productos comerciales si se reúne la producción de muchos mineros.

3.4 Concentración Gravimétrica y Flotación por Espuma

El tratamiento directo del concentrado gravimétrico primario mediante combinación de concentración gravimétrica rápida y flotación del relave, es también factible implementarse "in situ" para obtener concentrado enriquecido. La ley de este producto resulta mucho mayor y su peso mucho menor que la obtenida por concentración gravimétrica, por lo que puede fundirse directamente con un costo muy bajo. La principal desventaja de esta alternativa frente a la que emplea concentración magnética es que se requiere equipo de mayor dimensión, y mas energía, para la concentración gravimétrica y flotación.

La otra desventaja es que el circón y rutilo se pierden con el relave de flotación, pero ello tiene poca importancia en la MPE.

4. CONCLUSIONES

- La tecnología desarrollada permite que la MPE pueda recuperar el oro de las gravas auríferas sin emplear mercurio aún en condiciones tan difíciles como las que imperan en la Selva Peruana. Los resultados alcanzados hasta la fecha demuestran que ello es posible gracias a la Separación Magnética de los minerales de poco valor y la reducción significativa del peso del producto que

contiene el oro; esto permite el traslado del producto a poblados donde puede procesarse adicionalmente para obtener oro semirrefinado o refinado si fuera el caso.

- La Separación Magnética propuesta en la invención en desarrollo requiere intensidades de campo sumamente altas para ser efectivas, y para ello se ha empleado imanes permanentes de neodimio con intensidades magnéticas en el orden de 13,000 gauss. El sistema simple, rápido y de bajo costo garantiza su aceptación y uso por parte de los mineros de la MPE.
- El sistema propuesto no puede ser exitoso si no se complementa con un sistema de tratamiento del concentrado enriquecido que también sea rápido, eficiente y de bajo costo; se han propuesto diversos métodos para ello, la mayor parte de los cuales ya han sido experimentados por los autores.
- Otro atributo del sistema propuesto que permite poner en práctica la invención en desarrollo es el análisis químico rápido y con bajo costo del concentrado enriquecido obtenido por el MPE, pues ello permite cerrar su circuito económico sin recargarle las responsabilidades de participar en procesos complicados. En este caso es la gente profesional y de experiencia la que se hace cargo de las etapas finales del sistema y maneja, cuando es el caso, los reactivos de mayor toxicidad.
- Se ha desarrollado también un sistema que integra la concentración magnética en cada operación, el transporte y tratamiento individual y conjunto del concentrado enriquecido y la comercialización en un establecimiento central situado en un poblado.
- La propuesta considera sistemas de reciclaje y regeneración de reactivos tóxicos o contaminantes, así como su destrucción total luego de su uso; considera también su producción a partir de materiales no tóxicos que pueden ser transportados a la Selva sin riesgo alguno para la salud y ecología.
- La propuesta considera también sistemas que no incluyen lixiviación ni emplean reactivos tóxicos; en este caso el sistema complementario de fundición resulta rentable debido a la notable reducción del peso del concentrado y a la complementación con procesos adicionales como flotación.
- Finalmente se han descrito los equipos que se están perfeccionando para que puedan ser empleados por la MPE en el mismo lugar de sus operaciones. Algunos de ellos requieren de

fuentes externas de energía y el diseño está dirigido a minimizar su tamaño y el consumo de energía; en el caso peruano se va a aprovechar la experiencia del Instituto de Motores de la Universidad Nacional de Ingeniería en generadores eléctricos accionados por GLP y/o Gas natural; asimismo cabe resaltar la gran conveniencia de los motores de combustión externa que esta misma institución está experimentando.

- Como una alternativa adicional se han diseñado sistemas que operan con esfuerzo manual moderado y no requieren fuentes externas de energía.
- La producción de oro sin mercurio en la MPE Peruana hará posible que este sector alcance un alto nivel de estándar ambiental, facilitando de ese modo su financiamiento y desarrollo sostenible; asimismo podrá obtener una mejor cotización por el oro producido bajo la modalidad de "Oro Ecológico" u "Oro Verde"; el sistema propuesto reduce además el esfuerzo físico del MPE, recupera mas oro y otros valores adicionales prescindiendo del gasto y dependencia que significaba emplear mercurio. El sistema también puede ser aplicado en otros países donde existe actividad artesanal aurífera.

5. REFERENCIAS

1. Global Mercury Project, *GMP News*, 01 January 2003, 2.
2. Villachica, C.A., Sinche, C.C. *Non-conventional peruvian processing for improving gold and silver recoveries*. International Mining, pp 42-46, London, England. Julio 1987.
3. Plaksin, I.N., Kozhukhova, M.A. *Solubility of gold and silver in solutions of thiourea*. Inst. Tsvetn. Metal 33, pp.107-119, Moscú, Rusia, 1960.
4. Gabra, G. *A kinetic study of the leaching of gold from pyrite concentrate using acidified thiourea*. Precious Metals: Mining, Extraction, and Processing. Ed. V. Kudryk, AIME, pp 145-173, Pennsylvania, USA, 1983.
5. Migachev, I.F., Sedelnikova, G.V., Krylova, G.S., *Iodine and Bromine Solvents of Gold from mineral raw material*. International Mining and Environment Congress, pp-33-44, Colegio de Ingenieros del Perú, Lima, Perú. Julio 1999.
6. Ficeriová, J., Baláz, P., Villachica, C. *Thiosulfate leaching of silver, gold and bismuth from complex sulfide concentrates*. Hydrometallurgy 77 (2005), pp 35-39. Amsterdam, Netherland.