



## **EL USO DE BORAX PARA UNA PRODUCCIÓN DE ORO SIN MERCURIO EN LA MINERÍA A PEQUEÑA ESCALA**

Arequipa, Julio 2017

# EL USO DE BORAX PARA UNA PRODUCCIÓN DE ORO SIN MERCURIO EN LA MINERÍA A PEQUEÑA ESCALA

Dr. rer. nat. Oswald Eppers<sup>1</sup>

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 LA PROBLEMÁTICA DEL USO DE MERCURIO EN LA MINERÍA DE PEQUEÑA ESCALA

Tanto en el Perú como en muchos otros países mineros, en las actividades de la pequeña minería y minería artesanal se utiliza el mercurio de forma rutinaria para separar el oro grueso de los minerales auríferos<sup>2</sup>. Para tal fin, los minerales molidos se mezclan típicamente en un quimbaleta con mercurio líquido, y mientras se sigue moliendo el mineral, se forma una amalgama sólida de mercurio-oro que luego se separa y se calienta para vaporizar el mercurio y obtener el oro el cual generalmente se encuentra mezclado con plata.

A nivel mundial, más de 10 millones de mineros en la minería a pequeña escala utilizan alrededor de 1400 toneladas de mercurio por año, haciendo de esta actividad la fuente más grande de liberación de mercurio al medio ambiente<sup>3</sup>. Solamente en la región de Arequipa se estima que existen entre 30 y 50 mil pequeñas empresas mineras dedicadas a la producción de oro<sup>4</sup>. La gran mayoría de estos mineros aún utilizan mercurio para la extracción de oro, trabajando sin ningún control sobre las emisiones de vapores tóxicos provenientes de este metal líquido, ni de la pérdida del mercurio en los residuos mineros procesados (relaves).

En el año 2014 la producción de oro informal o ilegal en Perú fue estimada en 20.2 toneladas<sup>5</sup>. No existen datos confiables sobre la producción informal e ilegal de oro en la región de Arequipa, pero algunas fuentes estiman que ésta se aproxima a 2.6 toneladas anuales<sup>6</sup>. Considerando que se pierden entre 5 y 10 kg de mercurio (en casos extremos hasta 25 kg) para recuperar 1 kg de oro<sup>7</sup>, las actividades de la pequeña minería y minería artesanal en Arequipa liberan por año entre unos 13 y 26 toneladas de mercurio al medio ambiente, en su mayoría en forma de vapores y relaves contaminados. Mientras la formación de vapores tóxicos de mercurio es considerada el problema más importante para la salud humana, la contaminación de los relaves con mercurio también tiene un alto impacto ambiental.

Durante el proceso de molienda y amalgamación realizado en el quimbaleta o también en el molino chileno (trapiche), se forma la llamada "harina de mercurio". El nombre "harina de mercurio" proviene del polvo blanco fino que se forma a menudo como resultado de una distribución microscópica del mercurio elemental y de partículas de amalgama en la pulpa del mineral molido. Una separación cuantitativa de este mercurio microscópico de los relaves manualmente ya no es factible y requiere la aplicación de técnicas de concentración gravimétrica más avanzadas.

Un estudio realizado en el centro minero de Mollehuaca (provincia de Caraveli en Arequipa) por la Autoridad Regional Ambiental de Arequipa (ARMA) con apoyo de la Cooperación Alemana al Desarrollo, implementado por la GIZ en el Perú, reveló que los relaves provenientes de la amalgamación en quimbaletes en gran parte deben ser clasificados como residuos peligrosos por su alto contenido de mercurio residual<sup>8,9</sup>. Los residuos (relaves) provenientes de la amalgamación en quimbaletes contenían

<sup>1</sup> Asesor Internacional de la Cooperación Alemana al Desarrollo, Implementado por la GIZ en el Perú. Asesora la Autoridad Regional Ambiental de Arequipa, ARMA en temas de la gestión ambiental y la sostenibilidad de la pequeña minería y minería artesanal.

<sup>2</sup> "Oro grueso" típicamente es caracterizado por su granulometría con partículas mayores a 150 µm y "oro fino" inferiores a 150 µm.

<sup>3</sup> United Nations Environment Program: Environment for development [Internet]. Nairobi, Kenya: UNEP. Reducing mercury in artisanal and small-scale gold mining (ASGM); mayo 2012; [goo.gl/p1y9Xccontent\\_copy](http://goo.gl/p1y9Xccontent_copy)

<sup>4</sup> Gobierno Regional de Arequipa aprueba la formación de Comités de Vigilancia Ambientales para una Minería Sostenible, Noticia Proambiente 22.09.2016; [http://proambiente.org.pe/noticia\\_notas.php?id=136&aid=&pagina=](http://proambiente.org.pe/noticia_notas.php?id=136&aid=&pagina=) ; Rumbo Minero, 4 de enero, 2017; <http://www.rumbominero.com/noticias/mineria/mas-de-46000-mineros-podran-formalizarse-en-arequipa/>

<sup>5</sup> Victor Torrez Cuzcano, Minería ilegal e informal en el Perú: Impacto Socio-Económico, cuadernos de CooperAcción N°2 (Agosto 2015); <https://goo.gl/OhfVW7>

<sup>6</sup> Guillermo Medina, Formalización de la Minería en Pequeña Escala (2014), Better Gold Initiative – Oro Responsable; [http://www.iniciativaororesponsable.org/pdf/formalizacion\\_mineria\\_pequena\\_escal.pdf](http://www.iniciativaororesponsable.org/pdf/formalizacion_mineria_pequena_escal.pdf)

<sup>7</sup> Manejo Ambiental en la Pequeña Minería, Proyecto GAMA-COSUDE, 2000 (<http://www.gama-peru.org/libromedmin/>) (capítulo 5.3.3).

<sup>8</sup> Residuos peligrosos son aquéllos que, por sus características o el manejo al que son o van a ser sometidos, representan un riesgo significativo para la salud o el ambiente. Para determinar si un residuo minero es peligroso, se recomienda utilizar la "Guía para la

concentraciones de mercurio en promedio de unos 60 mg/kg, con algunas muestras excediendo 400 mg/kg. Una muestra de relaves de un proceso realizado con molino chileno mostró una concentración residual de mercurio de 37 mg/kg, demostrando que la problemática no es limitada al uso de quimbaletes para la amalgamación. La gran mayoría de los relaves analizados exceden el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de 24 mg/kg para mercurio en suelos comerciales, industriales y extractivos<sup>10</sup>, lo que demuestra el riesgo potencial para la salud y el medio ambiente de estos residuos mineros. Debido a la práctica de extraer el oro fino residual en los relaves mediante la cianuración, los relaves generalmente son proveídos a plantas de cianuración. Esta práctica aún potencializa el riesgo debido a la formación de compuestos entre el cianuro y el mercurio que aún son mucho más tóxicos que el mercurio elemental mismo<sup>11</sup>.

Mediciones de la concentración de vapores de mercurio en los alrededores de quimbaletes trabajando con la amalgamación de minerales<sup>12</sup>, demuestran valores hasta unos 38 veces por encima del límite permisible de 25 micro-gramos por metro cúbico de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en el lugar de trabajo (TWA, media ponderada en el tiempo)<sup>13</sup>. Como consecuencia, una persona trabajando en este ambiente puede estar expuesta en tan solo 12 minutos a una dosis de mercurio permitida para toda una jornada de trabajo de ocho horas. En los alrededores de los predios de centros mineros, donde se realizan actividades de amalgamación a circuito abierto (o sea sin controlar la evaporación incontrolada de vapores de mercurio), se midieron concentraciones entre 5 y 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Considerando el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) de 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vigente para la concentración de vapores de mercurio en el aire ambiente<sup>14</sup>, residentes viviendo en la cercanía a estas actividades mineras, tienen una exposición que puede superar el valor legalmente permitido hasta unos 30 veces. La máxima concentración de vapores de mercurio se mide en ambientes donde se quema la amalgama a fuego abierto para separar el oro. En un estudio realizado por Malm (1998)<sup>15</sup>, se midieron 60 mil (!)  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en un ambiente cerrado donde se realizó la quema de amalgama sin el uso de una retorta.

**En conclusión, el proceso de amalgamación con mercurio en su forma tradicional incluye un alto riesgo para la salud de los mineros y la población entera debido a la exposición a los vapores tóxicos de mercurio y residuos sólidos contaminados.**

## 1.2 Convenio de Minamata – un acuerdo internacional para la erradicación del mercurio

El “Convenio de Minamata sobre el Mercurio” es un tratado mundial para proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos del mercurio. Los términos del convenio se acordaron en cinco sesiones del Comité Intergubernamental de Negociación (CIN) sobre el Mercurio en Ginebra entre junio de 2010 y enero de 2013. El Convenio de Minamata con los acuerdos del CIN sobre el mercurio, se aprobó en una Conferencia Diplomática (Conferencia de Plenipotenciarios) en Kumamoto, Japón.

El Perú es uno de los 128 países que ha suscrito el Convenio que contiene las metas y mecanismos internacionales para facilitar las acciones que los países deben realizar para prevenir emisiones y vertimientos de mercurio que ponen en riesgo la salud humana y al medio ambiente en todo el mundo. Los aspectos más destacados del Convenio de Minamata incluyen la prohibición de la minería de mercurio, la reducción del uso del mercurio en una serie de productos y procesos, la promoción de medidas de control de las emisiones a la atmósfera, la tierra y al agua, así como la regulación de las actividades de la pequeña minería y minería artesanal. El Convenio también se encarga del almacenamiento provisional de mercurio y su eliminación una vez que se convierte en residuo, la remediación de pasivos ambientales contaminados con mercurio y temas sanitarios.

---

Elaboración de Estudios de la Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente (ERSA) en Sitios Contaminados”, aprobado mediante RM N° 034-2015 MINAM.

<sup>9</sup> “Investigación de la Contaminación Ambiental en el Municipio de Mollehuaca – Fase II”; ARMA-GIZ (junio 2014); <http://siar.minam.gob.pe/arequipa/documentos/informe-investigacion-ambiental-mollehuaca-caraveli-fase-ii>; <https://goo.gl/YniAL4>

<sup>10</sup> D.S. N° 002-2013-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo

<sup>11</sup> ARMA-GIZ, Buenas Prácticas de Gestión Ambiental para Plantas Hidrometalúrgicas de la pequeña minería y minería artesanal que utilizan Cianuro; <http://siar.minam.gob.pe/arequipa/download/file/fid/52290>; <https://goo.gl/7j3jiW>

<sup>12</sup> Proyecto Ministerio de Ambiente, Corantioquia, Universidad Nacional: Proyecto piloto de producción más limpia en la pequeña minería y minería artesanal de oro en el nordeste antioqueño, para disminuir el uso y la contaminación de mercurio. Presentado en el Foro Andino sobre Minería Aurífera y Artesanal y de Pequeña Escala, Medellín Colombia, 20-22 de Noviembre, 2013.

<sup>13</sup> Decreto Supremo N° 015-2005-SA (Reglamento sobre Valores Límite Permisibles para Agentes Químicos en el Ambiente de Trabajo)

<sup>14</sup> Decreto Supremo N°003-2017-MINAM (Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias)

<sup>15</sup> Malm, O., 1998. Gold mining as a source of mercury exposure in the Brazilian Amazon. Environmental Research 77, 73-78.

En el Perú, el convenio fue aprobado por Resolución Legislativa N° 30352 y ratificado mediante Decreto Supremo N° 061-2015-RE el 25 de noviembre de 2015. De este modo, se constituye como el instrumento de gestión nacional más importante sobre el mercurio, el cual establece la hoja de ruta respecto a la implementación de medidas sobre fuentes de suministro y comercio de mercurio, productos y procesos con mercurio, minería artesanal, emisiones y liberaciones, almacenamiento temporal de mercurio, disposición de residuos y sitios contaminados. Mediante el Decreto Supremo N° 010-2016-MINAM, el Gobierno Peruano define el “Plan de Acción Multisectorial para la implementación del Convenio de Minamata sobre el Mercurio” donde se establece como fecha límite el Diciembre 2017 para la elaboración del “Plan de Acción Nacional para la minería artesanal y a pequeña escala”.

## **2. El bórax como alternativa en la recuperación de oro**

El Gobierno Regional de Arequipa con apoyo de la GIZ, realiza desde el año 2013 campañas de concientización y capacitación sobre los riesgos del mercurio en la extracción de oro en los diferentes centros mineros de la región. En estas capacitaciones también se promueven estrategias para reducir o eliminar la contaminación por mercurio. Sin embargo, hasta la fecha, los resultados de esos esfuerzos han sido aislados. Pero estando al corriente de la implementación del Convenio de Minamata con la amenaza de la desaparición de mercurio del mercado y la esperada subida gradual del precio de este metal, los mineros cada vez están más propensos a adoptar métodos para evitar el uso de mercurio en su proceso de producción. Por otro lado, el mayor obstáculo para la implementación de tecnologías limpias son los escasos recursos por parte de los mineros a pequeña escala, que desalientan la implementación de tecnologías limpias sofisticadas en la producción de oro. Una alternativa que no requiere mayores inversiones es la concentración gravimétrica del mineral y luego para la separación del oro la fusión del concentrado con bórax, una sustancia de baja toxicidad, fácil disponibilidad y bajo costo.

La historia del bórax en la minería de oro de pequeña escala comenzó hace más de treinta años, cuando un grupo de mineros de oro en la provincia de Benguet en las Filipinas del Norte aplicó este método por primera vez con éxito. Durante los siguientes años, alrededor de 20 mil mineros en esa área adoptaron el nuevo proceso. El método, que por su alto rendimiento y fácil aplicación fue rápido aprovechado por los mineros, se base en las siguientes etapas principales<sup>16</sup>:

1. Trituración y pulverización del mineral
2. Pre-concentración de la pulpa (mineral pulverizado más agua) en una canaleta
3. Concentración del pre-concentrado utilizando una batea u otro método mecanizado
4. Fusión directa del concentrado final con bórax para la separación del oro

A continuación, se describe la metodología en más detalle.

### **2.1 Trituración y pulverización**

Al inicio de la operación de separación del oro, el mineral debe ser triturado y molido para disminuir el tamaño de las partículas y obtener material pulverizado, el cual formará una pulpa liviana una vez mezclada con agua. En la minería artesanal, para tal efecto se utiliza principalmente la fuerza muscular con equipos básicos de apoyo como son el martillo y el quimbalete. En operaciones de la pequeña minería con mayor producción y aplicación de maquinaria más sofisticada, el proceso de la trituración y pulverización se lleva a cabo con equipos de apoyo que generalmente funcionan con energía eléctrica.

Para el proceso de pulverización, el equipo más distinguido es el molino de bolas, utilizando el principio de impacto y atrición. Con ese equipo se logra la reducción del tamaño de las partículas mediante el impacto de bolas de acero. Otra máquina cada vez más cotizada por los mineros es el molino chileno o trapiche, en el cual en una especie de batea circular, el mineral mezclado con agua es molido mediante dos pesadas ruedas las cuales van girando por encima del material. Esta tecnología también se utiliza para realizar la amalgamación por su alta capacidad de molienda, en remplazo de un quimbalete. Sin embargo, con respecto a los impactos sobre la salud de los mineros y al ambiental, esta práctica no tiene ventajas considerables. Al igual que en los quimbaletes se realiza la amalgamación sin control de los vapores tóxicos de mercurio y además sigue el problema de la pérdida de amalgama y mercurio en los relaves por la formación de harina de mercurio.

---

<sup>16</sup> Peter Wiltje Uitterdijk Appel, Leoncio Degay Na-Oy, Mercury-Free Gold Extraction Using Borax for Small-Scale Gold Miners, Journal of Environmental Protection, 2014, 5, 493-499.

El proceso de la preparación del mineral y en particular la pulverización es de gran importancia para la separación del oro. El oro en el mineral no siempre está distribuido en forma de partículas libres (charpas o pepitas), más bien existen minerales donde el oro está encapsulado y por lo tanto atrapado dentro de la matriz del mineral. Estos minerales, muchas veces sulfuros polimetálicos pero también óxidos complejos, deben ser molidos hasta una granulometría muy fina<sup>17</sup> para poder liberar, concentrar y extraer el oro.

Un tamaño de grano apropiado se puede lograr utilizando pantallas o tamices. En forma general, la práctica ha demostrado que la operación de la pulverización es esencial para el funcionamiento óptimo de la mayoría de los procedimientos de la concentración gravimétrica. Una vez que el material aurífero tiene una granulometría apropiada con un tamaño de grano relativamente constante, uno (o varios) de los métodos descritos a continuación pueden emplearse para la concentración gravimétrica.

## 2.2 Concentración Gravimétrica

Luego de la trituración y pulverización se comienza con la concentración gravimétrica del mineral. Concentración significa aumentar la cantidad de oro en el mineral mediante la eliminación selectiva de granos más ligeros. La mayoría de los métodos de concentración se basan en la alta densidad del oro con respecto a otros minerales presentes en la roca como es la arenisca o el limo. Estos métodos se conocen como métodos de concentración gravimétrica. Las propiedades magnéticas o químicas también pueden ser explotadas para optimizar la concentración (utilizando por ejemplo imanes permanentes o campos electromagnéticos).



Foto 1 – Molino Chileno (Trapiche)

Con respecto a la metodología óptima de concentración, hay que destacar que cada operación minera es única. Los métodos de concentración deben ser seleccionados de acuerdo a factores tales como el tipo de mineral o sedimento, otros minerales presentes, la granulometría del material molido, la forma y la granulometría de oro, y además las condiciones externas como la disponibilidad de agua y electricidad.

Los siguientes métodos de concentración gravimétrica son los más utilizados en la pequeña minería y minería artesanal:

- *Canaletas*

Las canaletas son utilizadas para concentrar una mezcla de mineral o sedimento molido con agua (pulpa). En la pequeña minería y minería artesanal, son el equipo más importante para la concentración gravimétrica por su bajo costo, fácil operación, alta capacidad y la buena concentración del oro sin la necesidad de electricidad<sup>18</sup>. Como desventajas de este método, los mineros mencionan frecuente-mente la necesidad de mucha mano de obra, el trabajo en lotes en vez de trabajar en forma continua y la baja recuperación de sulfuros acompañantes.

Las canaletas generalmente consisten de un canal hecho de madera, a través del cual fluye la pulpa. Existe una gran variedad de canaletas, pero en la práctica se utilizan alfombras, esclusas u otras trampas para la captura del oro junto con otros minerales pesados, los cuales se concentran en el fondo de las trampas o en las fibras de la alfombra, mientras el agua transporta a los sólidos livianos hacia abajo. Las canaletas están inclinadas generalmente en un ángulo de 5 a 15 grados con una longitud mínima de dos metros aproximadamente. Sin embargo, en ensayos realizados en el marco de un proyecto de la cooperación Suiza<sup>19</sup>, se demostró que la cuota de recuperación del oro no depende mucho de la longitud de la canaleta ya que la mayor parte de la separación ocurre en la parte inferior de la misma<sup>20</sup>.

<sup>17</sup> preferiblemente menor a malla #200, o sea un tamaño de partículas menor a 0.074 mm o 74  $\mu\text{m}$ .

<sup>18</sup> Manejo Ambiental en la Pequeña Minería, Proyecto GAMA-COSUDE, 2000 (<http://www.gama-peru.org/libromedmin/>)

<sup>19</sup> Proyecto GAMA, un proyecto de cooperación bilateral entre los Gobiernos de Suiza y Perú, con el objetivo de mejorar la situación ambiental de la minería artesanal (realizado entre los años 2000 y 2008); <http://www.gama-peru.org/>

<sup>20</sup> Hermann Wotruba y Jürgen Vasters, Estudio para mejorar el proceso de quimbalteo minimizando las pérdidas altas de mercurio; [http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download\\_wiki\\_attachment.php?attId=122](http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=122)

Dependiendo del tipo de alfombra o material utilizado para crear las esclusas, se puede concentrar tanto oro grueso como oro fino<sup>21</sup>. Con respecto a la pulpa, se encontró que la densidad de la pulpa (relación mineral:agua) debería ser alrededor de 1:4 en peso para material aluvial con oro grueso o mediano, hasta 1:10 para mineral con oro fino. El agua utilizada en la concentración puede ser reusada, utilizando pozas o tanques de sedimentación. Las alfombras u otros dispositivos de captura sobre la parte inferior de las esclusas pueden ser retirados y lavados en un depósito con agua que contiene una pequeña cantidad de detergente para separar el material denso capturado con el oro.



**Foto 2 – Canaleta**

En ensayos realizados en la región de Caravelí y Mollehuaca en Arequipa por el proyecto “Iniciativa de Oro Responsable”<sup>22</sup>, se encontraron factores de concentración típicos en el rango de 10. O sea, de una tonelada de mineral concentrado, se obtuvo un concentrado de unos 100 kg que contenía la mayor parte del oro presente en el material. La extracción del oro mediante amalgamación realizada en un total de siete pruebas con diferentes tipos de mineral, resultó en una recuperación promedio de unos 11% más oro en comparación con el proceso tradicional sin concentración. Este aumento en la recuperación de oro más que compensa el uso adicional de agua en comparación con la amalgamación tradicional, a pesar de la escasez y los costos elevados del agua en algunas zonas áridas.

Aún mediante una pre-concentración gravimétrica del mineral utilizando una simple canaleta de rejillas o cubierto con una alfombra, se puede reducir la cantidad de mercurio necesario hasta en un 90%, logrando así una mejor recuperación de oro en comparación a la amalgamación del mineral en bruto sin concentración<sup>22</sup>.

A pesar de los buenos resultados de concentración de grandes cantidades de minerales y sedimentos en un tiempo relativamente corto, a menudo la concentración no produce un concentrado con tan altas cantidades de oro como requerido para una fusión con bórax. Por lo tanto, el concentrado resultante generalmente debe someterse a métodos adicionales de concentración, tales como la concentración manual mediante batea o en caso de cantidades mayores técnicas como la mesa de concentración.



**Foto 3 – Lavado de la alfombra de canaleta para recuperar el concentrado con oro**

Otros métodos de concentración gravimétrica apenas se utilizan en las actividades de la pequeña minería y minería artesanal en la región de Arequipa, esto debido a su elevado costo de inversión requerido y la falta de capacitación en su aplicación. Entre las técnicas con mayor potencial de aplicación, se encuentran las mesas vibratorias y los equipos centrífugos de concentración gravimétrica que son presentados a continuación.

<sup>21</sup> Manejo Ambiental en la Pequeña Minería, Proyecto GAMA-COSUDE, 2000 (<http://www.gama-peru.org/libromedmin/>)

<sup>22</sup> Resultados de ensayos de campo realizado en el marco del proyecto “Iniciativa de Oro Responsable”, implementado por la empresa BGI (2016); presentación en curso de capacitación en Chala, Noviembre 2016.

- **Batea**

El equipo más antiguo y simple para la concentración manual de sedimentos y minerales con oro es la batea, un tipo de cacerola plana, muchas veces con una forma cónica para captar el oro en una depresión ubicada en el centro. Durante el lavado del mineral o del sedimento se utiliza agua para separar las partículas pesadas de oro de otras partículas más ligeras. El proceso de lavado se realiza en movimientos circulares, utilizando el agua para expulsar los sedimentos ligeros y quedando con el oro conforme a su peso específico en la parte inferior de la batea. La concentración manual con batea funciona mejor cuando el oro es grueso y se encuentra liberado. Bajo condiciones adecuadas, el lavado puede producir concentrados de alto grado o incluso separar oro puro. En muchos casos, el oro concentrado puede ser aislado mediante una fundición directa con un fundente como el bórax, sin el uso de reactivos tóxicos como el mercurio o cianuro para la extracción.

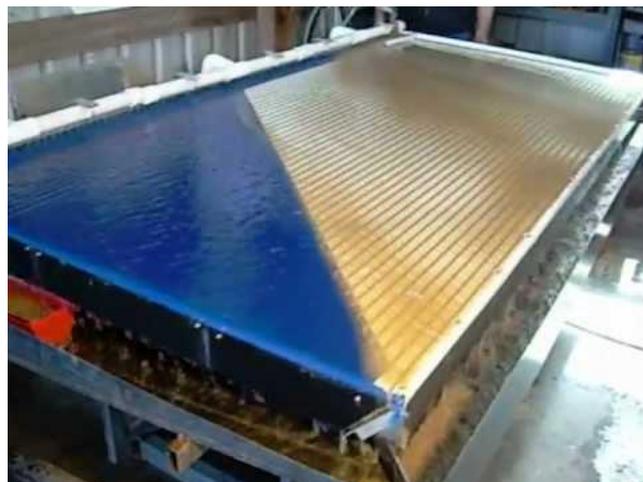
El uso de la batea ofrece a los mineros un método de bajo costo de concentración, pero requiere tiempo y habilidad para ser eficaz. Uno de los mayores inconvenientes es la pequeña cantidad de mineral que puede ser concentrado con este método. Por lo tanto, se recomienda aplicarla para la concentración de pre-concentrados, obtenidos por ejemplo mediante una canaleta.



**Foto 4 – Batea con concentrado**

- **Mesas de Concentración**

Las mesas de concentración o mesas vibratorias son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. Para alcanzar una separación de las partículas de mineral dependiendo de su peso específico y el tamaño de partículas, se aplica un movimiento longitudinal vibratorio de tal forma, que las partículas forman bandas en abanico (cejas). De esta manera se pueden separar las diferentes fracciones de mineral presentes y en particular el oro. Las mesas de concentración son muy eficaces y versátiles, por lo cual pueden concentrar hasta más de una tonelada por hora de mineral y así proporcionar concentrados de alta ley de oro fino hasta ultra-fino. En este sentido, son un complemento ideal para la concentración gravimétrica de los pre-concentrados obtenidos mediante las canaletas u otros métodos.



**Foto 5 – Mesa de Concentración**

- **Centrifugadoras**

Otra metodología que tiene un alto potencial de aplicación, particularmente en combinación con un método de pre-concentración como es la canaleta, es la centrifuga. Una centrifuga es un recipiente que gira alrededor de un punto central con el objetivo de lograr una separación de los materiales en una mezcla gracias a diferencias en el peso específico de las partículas. Para separar partículas de oro a partir de un concentrado, éste se introduce en la centrifuga en forma de una pulpa o suspensión con alrededor de 60-75% de agua y 40-35% de sólidos. El material se acumula en un recipiente en el centro de la máquina y la rotación a alta velocidad crea la fuerza centrífuga, haciendo que el material se adhiera a las paredes del equipo centrifugador.

El material más denso y pesado como el oro está atrapado en las crestas de la centrifuga, mientras que el material más ligero se expulsa con el flujo de agua hacia afuera en un recipiente o tanque de sedimentación. Después de que se complete un ciclo, el minero puede extraer el concentrado con oro de las crestas de la vasija de la centrifuga. Para un trabajo eficiente dependiendo de las características del mineral, se requiere material bien molido con granulometría fina, además de ajustes

en la velocidad de alimentación, velocidad de rotación, y la duración del ciclo. Las centrífugas pueden ser más eficaces en la concentración de oro que otros métodos, pero son generalmente más caros y el minero requiere más capacitación para su uso adecuado del mismo.

Otros métodos de concentración como los concentradores espirales, concentradores de vórtices (Vortex), el Jig, el ciclón (trabaja con un flujo de aire en vez de agua), la flotación, o la separación magnética aún no son muy conocidos en el sector de la minería de oro a pequeña escala en la región de Arequipa.

Para la recuperación de oro fino y ultra-fino encapsulado en sulfuros polimetálicos, una combinación de molienda por impacto y el uso de la metodología de flotación<sup>23</sup> o también de la concentración en seco utilizando un ciclón (y sin ningún reactivo adicional) fueron aplicados con éxito en operaciones de la minería a pequeña escala<sup>24</sup>.



Foto 6 – Centrífugadora

## 2.3 Fusión directa con Bórax

### 2.3.1 Propiedades de Bórax

El bórax químicamente es tetraborato de sodio ( $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) y se encuentra de forma natural en los depósitos producidos por la evaporación de los lagos estacionarios, como es el caso de la Laguna de Salinas en Arequipa. El bórax se funde a 743 °C y en una mezcla con el concentrado disminuye el punto de fusión para toda la carga.

Con respecto a su toxicidad, el bórax es considerado una sustancia de baja toxicidad. En estudios toxicológicos realizados con ratas se determinó una dosis letal ( $\text{LD}_{50}$ , es decir la muerte en 50% de los casos) de 2.66 g/kg peso corporal<sup>25</sup>. Eso significa que una persona adulta de 70 kg debería consumir unos 186 gramos (aprox. 12 cucharas) para sufrir consecuencias mortales. Por lo tanto, en comparación con el mercurio y el cianuro, el bórax es una sustancia de muy baja toxicidad. Como sucede con casi todas las sustancias químicas, existen efectos nocivos en caso de una exposición crónica o a altas concentraciones, entre los que se deben mencionar los siguientes<sup>25</sup>:

- Inhalación: La inhalación de los polvos puede causar irritaciones del tracto respiratorio
- Contacto con los ojos: El producto puede causar irritación y enrojecimiento en ojos y párpados
- Contacto con la piel: prolongados contactos con la piel pueden causar irritaciones y dermatitis crónica
- Ingestión: la ingestión puede causar mareos, náuseas y vómito



Foto 7 – Concentrado de oro para la fusión con bórax

<sup>23</sup> a) Proyecto GAMA, <http://www.gama-peru.org/libromedmin/capitulo/5/5-6-2.htm>, b) Mirelly Araujo, Ángel Azañero, Daniel Lovera, Optimización en la recuperación de oro de minerales mixtos en Cerro Corona - goldfields La Cima, Rev. del Instituto de Investigación (RIIGEO), FIGMMG-UNMSM, Vol. 17, Nº 33, pp. 27-37 Enero -Junio 2014.

<sup>24</sup> Información personal de la empresa EMRECOS, Juliaca, Perú

<sup>25</sup> Borax - toxicity, ecological toxicity and regulatory information. PAN pesticides database (base de datos de pesticidas) ([http://www.pesticideinfo.org/Detail\\_Chemical.jsp?Rec\\_Id=PC34355](http://www.pesticideinfo.org/Detail_Chemical.jsp?Rec_Id=PC34355))

En el reglamento sobre valores límites permisibles para agentes químicos en el ambiente de trabajo (Decreto Supremo N° 015-2005-SA) se ha definido para el bórax un límite TWA<sup>26</sup> permisible de 5 mg/m<sup>3</sup> durante una jornada de ocho horas. La comparación de este límite con el límite permisible de 0.025 mg/m<sup>3</sup> de vapor de mercurio en el ambiente de trabajo refleja la gran diferencia en la toxicidad entre ambas sustancias.

A pesar de la baja toxicidad del bórax, se recomienda lavar las manos siempre después del trabajo con este material y evitar la inhalación del polvo.

### 2.3.2 Fusión directa con Bórax

Para la fusión directa del concentrado con bórax, se utiliza un crisol de arcilla y preferiblemente un soplete con gas de GLP, gas natural o acetileno. La temperatura de la llama del GLP o gas natural alcanza temperaturas entre unos 1900 a 1950°C, mientras el acetileno alcanza temperaturas hasta 2250°C.

Generalmente el gas natural es suficiente para fundir la mezcla de mineral con bórax si se agrega unos pedazos de carbón vegetal para aumentar la temperatura. En el caso de que la llama no alcanza la temperatura suficiente para lograr una fusión, existe la posibilidad de aumentar la cantidad del fundente bórax en relación a la cantidad del concentrado, modificar el fundente (agregando al bórax por ejemplo sustancias como carbonato o nitrato de sodio) o utilizar otro gas más caliente como es el acetileno.



**Foto 8 – Crisol con carbón vegetal y el concentrado más bórax fundido. En el fondo se puede ver la pepita de oro fundido.**

Antes de colocar la mezcla de concentrado con el bórax al crisol de cerámica, se recomienda verificar la resistencia del mismo a las temperaturas altas. Por tal efecto se agrega unos gramos de bórax con unos pedazos de carbón vegetal y se funde el bórax con el soplete. Una vez verificado la resistencia del crisol, se coloca la bolsa con la mezcla del concentrado y bórax dentro del crisol, y se comienza con la fusión. Generalmente es suficiente mezclar cantidades iguales del concentrado y de bórax para lograr una buena fusión. El calentamiento con el soplete durante unos 5 a 10 minutos provoca que la mezcla funda y el oro fundido se acumula en el fondo del crisol donde puede ser recogido por ejemplo mediante una cuchara larga, para ser posteriormente enfriado en un recipiente con agua. También se puede esperar hasta que se enfríe la masa para luego separar el oro de la escoria que se forma en la parte superior utilizando cuidadosamente un pequeño martillo para no romper el crisol. Debido a que la escoria puede contener trazas de oro, se recomienda procesarla de nuevo conjuntamente con el mineral en el proceso de concentración.

### 3. Comparación entre los métodos de extracción con mercurio y mediante fusión con bórax

En la región de Arequipa, un número creciente de mineros utiliza la fusión con bórax para la extracción de oro, demostrando así el potencial de esta tecnología limpia. Los mineros que ya están utilizando bórax para la recuperación de oro confirman que el método es fácil de aplicar, no requiere una inversión mayor, se recupera más oro en comparación con el mercurio y más que todo reduce drásticamente el riesgo para la salud y el medio ambiente. La ARMA, en cooperación con la GIZ y la Universidad Mayor de San Agustín de Arequipa (UNSA), está planificando un programa con ensayos sistemáticos para demostrar las ventajas en comparación con el uso de mercurio y cianuro. Actualmente no se cuenta con datos analíticos de las empresas que están aplicando la metodología en la región de Arequipa ni en otras regiones en el Perú.

Sin embargo, ya existen datos de estudios realizados en Bolivia y en las Filipinas<sup>15</sup>. En la mina de oro “La Suerte”, en el noroeste de Bolivia, se realizaron pruebas en las cuales se utilizaron para cada prueba unos 50 kg de mineral para realizar una extracción clásica con mercurio y otra mediante la fusión con bórax. El mineral utilizado para la prueba proviene de una zona de cizallamiento con minerales de tipo cuarzo que contiene pirita, arsenopirita y oro de diferente granulometría. Por lo tanto, el ensayo es relevante para

<sup>26</sup> Media ponderada en el tiempo

varias zonas en Arequipa donde existen minerales auríferos con características parecidas. En ambos casos, la extracción de oro sin mercurio recuperó la mayor parte del oro.



**Foto 9 – Oro obtenido por fusión con bórax.**

Un resumen de los resultados se presenta en la Tabla 1. Un aspecto interesante de las pruebas en Bolivia fue que el tiempo utilizado para la concentración con canaleta y la fusión con bórax era un diez por ciento más corto en comparación con la amalgamación directa del mineral.

**Tabla 1 – Recuperación de oro utilizando amalgamación clásica vs. fusión con bórax**

Ubicación	Oro recuperado en gramos	
	Amalgamación con mercurio	Fusión con bórax
Suerte 1, Bolivia	0.1	0.5
Suerte 2, Bolivia	0.4	0.5
Gaang 1, Filipinas	1.2	3.2
Gaang 2, Filipinas	2.3	4.8
Gaang 3, Filipinas	1.8	4.2
Gaang 4, Filipinas	7.2	22.5
Kiaas, Filipinas 1	0.4	1.1
Kiaas, Filipinas 2	0.8	1.3

En Gaang y Kias, dos provincias en el norte de las Filipinas, se realizaron pruebas comparativas con mineral de cuarz, piritita y oro visible. Se realizaron dos series de pruebas, una con mercurio y otra con concentración mediante canaleta y batea, seguida por la fundición de bórax. Dado que el oro no está distribuido uniformemente en el mineral de oro, 7 a 14 sacos de mineral fueron utilizados para cada una de las pruebas. Como se puede apreciar en la Tabla 1, la recuperación de oro con bórax superó en todos los ensayos la recuperación utilizando amalgamación con mercurio. En algunos casos la cosecha superó hasta tres veces el resultado con amalgamación y los mineros reportaron que luego de practicar el método, el tiempo de producción se redujo en hasta unos treinta por ciento.

#### 4. Conclusiones

En el marco de la implementación del Convenio de Minamata, instituciones nacionales y regionales buscan caminos para la eliminación gradual del mercurio, utilizado en grandes cantidades en la pequeña minería y minería artesanal. Sin embargo, argumentos sobre los altos riesgos para la salud y el medio ambiente trabajando de forma inadecuada con el mercurio, por sí solos no son suficientes para convencer a los mineros e impulsar un cambio a otras tecnologías más limpias. La razón en primer lugar es la presión socio-económica de los mineros, quienes no cuentan con los recursos para invertir en tecnologías limpias. Por tal razón, es muy importante proporcionar una alternativa que tiene un mejor rendimiento que la amalgamación y que los mineros pueden aplicar sin grandes esfuerzos económicos y además sin la necesidad de recibir un entrenamiento complicado.

Una de estas alternativas es la fusión directa del concentrado de minerales auríferos con bórax para la recuperación del oro. El bórax es una sustancia de baja peligrosidad para la salud humana, bajo impacto ambiental en general, de fácil disponibilidad y además de bajo costo. Los resultados de ensayos realizados para comparar la fusión directa con bórax con la metodología clásica de la separación con amalgama demuestran que el método con bórax es superior a la amalgamación en punto de recuperación de oro y además requiere menos tiempo. Una de las ventajas más importantes es que puede ser aplicada con los equipos y maquinaria ya utilizados por la mayoría de los mineros de la pequeña minería y minería artesanal, con solamente pocas modificaciones. La razón por la cual se recupera más oro con el método de la fusión con bórax es porque se puede recuperar tanto el oro grueso como también el oro fino.

Además, no se pierden cantidades significativas de oro ni amalgama en los relaves por la prevención de la formación de harina de mercurio.

Dependiendo de la granulometría y distribución del oro en el mineral, esta alza de efectividad en la recuperación del oro puede llegar a tal punto que los relaves de la concentración ya no proporcionan cantidades de oro interesantes que justifiquen una lixiviación con cianuro para la recuperación del oro fino. En estos casos, el minero puede recuperar el oro casi en su totalidad por sí mismo y obtiene mayor rentabilidad al no tener que vender sus relaves a las plantas de cianuración. La consecuencia global puede ser un incremento sustancial en sus ganancias en comparación con el método clásico de extraer el oro grueso con amalgamación y vender los relaves para recuperar una parte del oro fino con lixiviación mediante cianuro en plantas de beneficio externas.

Debe aclararse que el método de fusión con bórax no es apropiado para todo tipo de minerales auríferos. Existen limitaciones con minerales con una granulometría de oro ultra-fina o con muy altos contenidos de sulfuros. Estos minerales requieren tecnologías de concentración gravimétrica más avanzadas, además de modificaciones en la composición del fundente (por ejemplo agregando peróxido de boro o de sodio para la descomposición de los sulfuros durante la fusión). En la región de Arequipa existe una gran variedad de minerales auríferos y se requiere más investigación para determinar la aplicabilidad de la metodología descrita en dependencia a la composición mineralógica.