

# Evaluación de un proceso de beneficio de minerales por amalgamación: Afectaciones al rendimiento

Isabel Pazmiño

Dirección de Minería, Metalurgia Extractiva y Ambiente  
Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero  
Metalúrgico  
Quito, Ecuador  
isabel\_pazmino@inigemm.gob.ec

Gustavo Muñoz

Centro de Investigación Aplicada de Metalurgia Extractiva  
Universidad San Francisco de Quito  
Quito, Ecuador  
gmunoz@usfq.edu.ec

**Abstract**— El proceso de recuperación de oro primario que se efectúa en gran parte de las actividades mineras artesanales y de pequeña escala es la amalgamación. Para evaluar el proceso de amalgamación y las posibles afectaciones al rendimiento se efectuó la descripción del proceso, el balance de mercurio, el balance metalúrgico de oro y la determinación de la velocidad de giro del tambor amalgamador en una planta de beneficio del sector de Chinapintza en la Provincia de Zamora Chinchipe. Los principales hallazgos de este estudio mostraron que el proceso empleado en la recuperación de oro se desarrolló en tres etapas: trituración manual, molienda y amalgamación. En el balance de mercurio se determinó que la distribución de éste en las corrientes de salida corresponde al 18,1% en la amalgama sólida, 78,4% en el mercurio recuperado al prensar la amalgama en un paño y 3,5% en las colas. Esto indica que menos de la quinta parte del mercurio se utilizó eficientemente para atrapar el mercurio en la amalgama. Por otra parte, la concentración de mercurio en los sólidos de las colas corresponde a 28,58 mg/kg. La recuperación de oro mediante amalgamación es del 33,33%, con el cual se obtuvieron 2,2 g de oro. Sin embargo, el mayor contenido de oro está presente en el relave con un 60,57%. Estos resultados son un indicativo de la baja eficiencia en la recuperación de oro mediante el uso de mercurio. Finalmente, se determinó que la velocidad de giro del tambor amalgamador es de 54 rpm, que es 1,5 veces mayor a la recomendada de 35,6 rpm de acuerdo al criterio de la velocidad crítica para molinos de bolas lo cual repercute en una baja eficiencia en la molienda y en la amalgamación.

*Palabras clave-amalgamación; mercurio; recuperación de oro*

## I. INTRODUCCIÓN

La utilización de mercurio es una práctica común en la minería artesanal y de pequeña escala dada por la facilidad y rapidez que implica su aplicación, la independencia que brinda al minero al no requerir de mano de obra adicional, por su bajo costo y facilidad de adquisición, por el rápido flujo de caja que genera, entre otras ventajas [1]. Sin embargo, las condiciones de la utilización del mercurio en la pequeña minería y minería artesanal generan grandes afectaciones al ser humano, al ambiente (aire, agua, suelos) y a otras actividades económicas de la región [2,3].

Con el objeto de mejorar los procesos de recuperación de metales preciosos y eliminar la utilización de mercurio en las actividades mineras, el componente de Transferencia de

Tecnología del Proyecto de Mejoramiento de las Condiciones de Trabajo de la Pequeña Minería y Minería Artesanal (PMCT-PM y MA), que ejecuta el Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico, INIGEMM, desarrolla estudios para brindar alternativas a la utilización del mercurio a los pequeños mineros y mineros artesanales. A continuación se presenta el estudio efectuado para evaluar el proceso de recuperación de oro primario por amalgamación en un tambor amalgamador y encontrar las posibles afectaciones al rendimiento.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la evaluación de la operación in situ de un tambor amalgamador o chancha, se efectuó el seguimiento del proceso desde la preparación del mineral para el procesamiento hasta la obtención de la amalgama. En la primera etapa, se procedió a la identificación de los equipos y operaciones principales. En cada operación, se midieron los volúmenes o masas involucradas y los tiempos de residencia. Se inició con la reducción de tamaño manual del mineral para obtener especies de hasta 10 cm mediante la utilización de un martillo. Posteriormente, se formaron dos muestras de 100 y 200 libras respectivamente. La primera (MC) se utilizó para asegurar la representatividad de la muestra y estudiar el contenido de metales del material de cabeza mediante una digestión ácida en microonda y la posterior lectura por ICP-OES en el laboratorio. La segunda se utilizó para el procesamiento y seguimiento del proceso. Dentro del tambor amalgamador, se adicionaron las barras de acero, el mineral y agua. Se cerró el equipo y se inició la molienda que se efectuó durante tres horas.

Una vez terminado el tiempo se vació el contenido del tambor amalgamador en un recipiente. Se destaca que una fracción del mineral añadido al inicio no se trituró (MSM) y se separó para estudiar su distribución de tamaño mediante la medición de la arista de mayor longitud, clasificación en rangos de tamaño desde menores a 2 cm hasta especies mayores a 10 cm y posterior medición de la masa contenida en cada rango. Se evidenció que las partículas no molidas tenían sus contornos redondeados, lo cual es un indicativo de que fueron desgastados. Para recuperar la totalidad del mineral se utilizó agua a presión. Se efectuó una agitación manual para evitar la precipitación del material fino y liviano, y mediante la adición de agua se provocó su rebose hasta obtener el primer

concentrado (MA), del cual se obtuvo una muestra, que se reprocesó posteriormente por amalgamación. Adicionalmente, se colocaron tres bloques de panela y 51 g de mercurio. Se cerró el tambor amalgamador y se inició la operación que duró tres horas. Una vez que se cumplió el tiempo, se paró el equipo y se procedió a recuperar el material amalgamado y descartar el relave de amalgamación (R). El material remanente se recuperó en una tina, y mediante un imán se separaron las especies con carácter magnético. Finalmente se recuperó la amalgama de oro y mercurio (A) en el platón, el concentrado de amalgamación (C) y el mercurio no amalgamado. Se colocó la amalgama dentro de un paño de tela y se exprimió para retirar el exceso de mercurio. Las muestras fueron analizadas para determinar el contenido de oro y de mercurio.

El balance de mercurio se efectuó al considerar las corrientes que se describen para la etapa de amalgamación mediante (1).

$$Hg_F = A_{Au-Hg} - Au_R + Hg_E + Hg_R \quad (1)$$

Donde  $Hg_F$  se refiere a la masa de mercurio alimentada,  $A_{Au-Hg}$  es la masa de la amalgama,  $Au_R$  es el oro recuperado al quemar la amalgama en el laboratorio,  $Hg_E$  es el exceso de mercurio recuperado al comprimir la amalgama y  $Hg_R$  es el mercurio restante que se descarta con el relave.

El balance de masa total se efectuó con base en (2) y para el balance de oro se utilizó (3).

$$F_R = C_A + R_A + A_{Au-Hg} \quad (2)$$

$$F_R * X_F = C_A * X_C + R_A * X_R + A_{Au-Hg} * X_A \quad (3)$$

Donde  $F_R$  se refiere a la alimentación recalculada ingresada al proceso de amalgamación,  $C_A$  al concentrado de amalgamación,  $R_A$  el relave de amalgamación y  $A_{Au-Hg}$  a la amalgama de oro y mercurio. Por otra parte  $X_F$ ,  $X_C$ ,  $X_R$  y  $X_A$  indican el contenido de oro de la alimentación, concentrado, relave y amalgama respectivamente.

Las masas y volúmenes, junto con los contenidos de oro reportados por el laboratorio, fueron la base para el cálculo del balance de oro y el balance de mercurio. Adicionalmente, se calculó el porcentaje de recuperación de oro.

Por otra parte, se consideró a la velocidad de giro del tambor amalgamador como un parámetro que influye en el rendimiento de la operación. Para esto, se midieron las rotaciones del tambor amalgamador y se determinaron la velocidad crítica (4) y la velocidad de giro recomendada (5).

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \quad (4)$$

$$V_g = 0.75 * V_c \quad (5)$$

Donde  $V_c$  es la velocidad crítica en revoluciones por minuto,  $D$  es el diámetro interno en metros y  $V_g$  es la velocidad de giro recomendada.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proceso de amalgamación se desarrolló en tres etapas: preparación del mineral, reducción de tamaño y amalgamación. En la Figura 1, se muestra el diagrama de bloques levantado

para el proceso con las operaciones unitarias empleadas y sus corrientes de entrada y salida. Adicionalmente, se indican los puntos en donde se tomaron las muestras para el análisis del contenido de oro y mercurio.

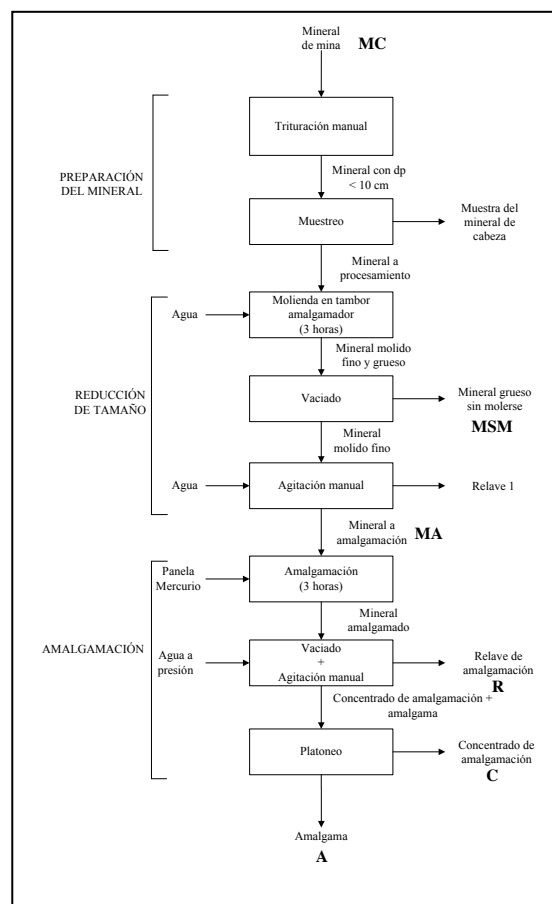


Figure 1. Diagrama de bloques del proceso de amalgamación

El mineral de cabeza presentó un contenido de Ag de 215 g/t. Adicionalmente se encontró una importante presencia de Fe con el 24,86%, Zn con 7,50%, Pb con 7,01% y 0,45% de Cu. El material que se ingresa para amalgamación presentó un tenor de Au de 98,2 g/t, determinado como alimentación recalculada. En la Tabla I se presentan las corrientes involucradas en la amalgamación y su cuantificación.

TABLE I. DISTRIBUCIÓN DEL MERCURIO EN EL PROCESO DE AMALGAMACIÓN

| Corriente |                                | Masa (g) | Distribución del mercurio (%) |
|-----------|--------------------------------|----------|-------------------------------|
| Entrada   | Mercurio alimentado            | 51,00    | 100,0                         |
|           | Mercurio en la amalgama sólida | 9,22     | 18,1                          |
| Salida    | Mercurio recuperado            | 40,00    | 78,4                          |
|           | Mercurio en el relave          | 1,78     | 3,5                           |

Se encontró que el mercurio que se desecha con el relave corresponde al 3,5% del mercurio alimentado debido a la separación deficiente de la amalgama y las colas [6]. En estudios paralelos realizados dentro del PMCT-PM y MA en la zona de Portovelo, en El Oro, y Ponce Enríquez en Azuay, se encontró que el contenido de mercurio en las colas de amalgamación corresponde a 14,8% y 3,3% respectivamente [4,5]. Adicionalmente, se han encontrado referencias de la presencia de mercurio en las colas entre 1,28% y el 27,5% [7]. La concentración de mercurio en los sólidos de las colas corresponde a 28,58 mg/kg. Como referencia se cita el estudio [2], en donde se menciona que se encontraron concentraciones de mercurio de 2-4 mg/kg a 9 km de la fuente en los sedimentos del Río Nambija. Por otra parte, la normativa ambiental vigente a través [8], en la tabla 2, Anexo 2 del Libro VI, dentro de los criterios de la calidad del suelo, exige que el contenido de mercurio sea inferior a 0,1 mg/kg en peso seco.

Por otra parte, el mercurio utilizado efectivamente en la amalgamación corresponde al 18,1%. En referencia a los estudios [4,5], la utilización de mercurio efectiva determinada fue de 2,1% para la operación de Ponce Enríquez y del 12% para la de Portovelo. La baja eficiencia en amalgamación se puede atribuir a la falta de selectividad y preparación del mineral a amalgamar por la presencia de impurezas que dificultan la reacción de amalgamación [9].

La recuperación del mercurio no utilizado a través del prensado de la amalgama en un paño corresponde al 78,4%. En [7], se encontró que la recuperación de mercurio en esta etapa corresponde al 56%, en [5] corresponde al 94,6% y en [4] al 73,2%. La distribución de mercurio en las corrientes estudiadas para el balance se resume en la Figura 2.

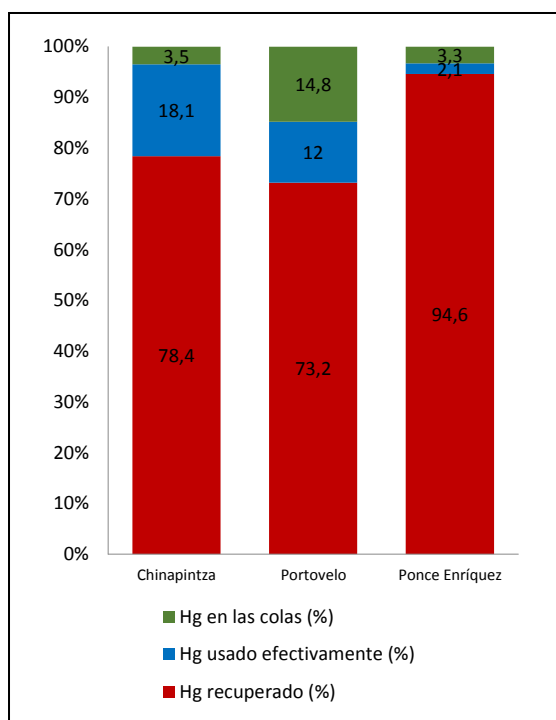


Figure 2. Distribución del mercurio en las corrientes del proceso [4,5]

El balance de masa para el oro se efectuó de acuerdo a la metodología expuesta en [10], en la etapa de amalgamación. En la Tabla II se indican los flujos y composiciones de las corrientes involucradas en el balance.

TABLE II. BALANCE DE MATERIALES Y DISTRIBUCIÓN DE ORO EN LAS CORRIENTES

| Corriente                   | Masa (kg) | Ley de oro (g/t) | Contenido de oro (g) | Distribución de oro (%) |
|-----------------------------|-----------|------------------|----------------------|-------------------------|
| Concentrado de amalgamación | 4,900     | 84,3             | 0,4                  | 6,26                    |
| Relave de amalgamación      | 62,270    | 64,2             | 4,0                  | 60,57                   |
| Amalgama                    | 0,013     | -                | 2,2                  | 33,33                   |
| Alimentación recalculada    | 67,183    | 98,2             | 6,6                  | 100,00                  |

Se encontró que el oro recuperado después de la quema de la amalgama es del 33,33% que corresponde a 2,2 g. Este valor es el que se comercializaría por el minero artesanal. Sin embargo, el mayor contenido de oro es el que se pierde en el relave con un 60,57% dado por el gran volumen de material que se desecha. Según [3], las colas descargadas poseen aproximadamente el 40% de metales, sulfuros y sulfatos que afectan el ambiente y además constituyen una pérdida económica dado que no son aprovechados. En los estudios [4,5], la recuperación de oro en la amalgama es 71,6% para la operación estudiada en Portovelo y tan solo del 9,7% para la zona de Ponce Enríquez. Esta distribución indica que el proceso de amalgamación efectuado no es eficiente para la recuperación de oro. En la Figura 3 se muestran los resultados de la distribución de oro en la amalgama y en las colas.

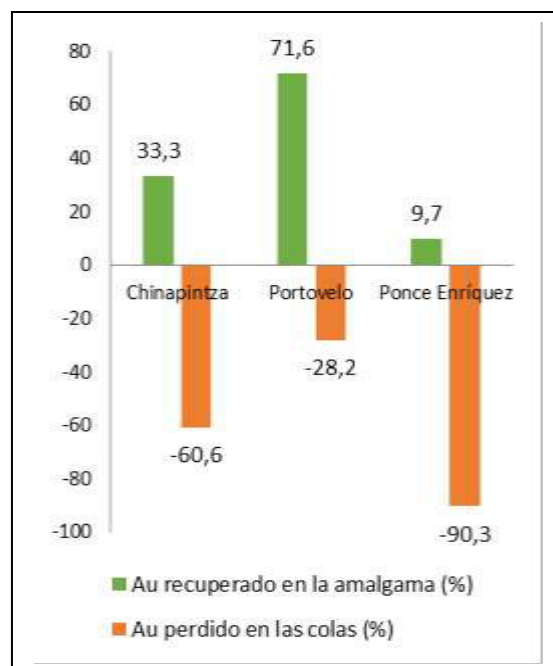


Figure 3. Distribución de oro en la amalgama y en las colas [4,5]

Adicionalmente, se determinó que la velocidad de giro del tambor amalgamador es de 54 rpm. Durante la rotación, la carga moledora debe elevarse hasta una posición de equilibrio dinámico que permita la formación de una cascada sobre el material que se encuentra en la base del molino para producir el rompimiento de las partículas como se muestra en el esquema A de la Figura 4 [11].

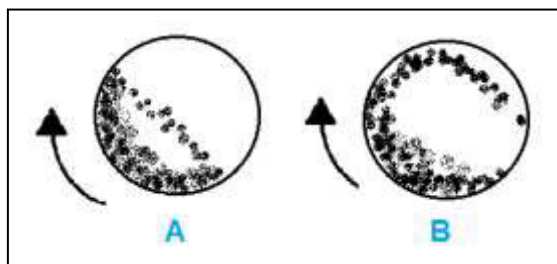


Figure 4. Movimiento de la carga moledora en el tambor amalgamador  
A) Trayectoria parabólica con una velocidad de giro del 75% de la velocidad crítica B) Trayectoria circular a la velocidad crítica o mayor

Con base en este criterio, la velocidad crítica calculada es 47,5 rpm y la velocidad de giro recomendada es igual al 75% de la velocidad crítica, es decir 35,6 rpm. Con estos resultados se determinó que el tambor amalgamador gira 1,5 veces más rápido de lo recomendado. En este caso, la carga moledora se mantiene en una posición fija en la pared del tambor con un movimiento centrífugo lo cual impide la caída de las barras sobre el mineral como se indica en el esquema B de la Figura 4 [11]. Esta práctica contribuyó a que el material no se triturará adecuadamente en la primera etapa, en donde el 26% del material no se molió apropiadamente y se retiró del proceso. Este material presentó un tamaño de partícula de 8,6 cm como se muestra en la distribución del tamaño de partícula y determinación de la Figura 5. Adicionalmente, las pérdidas de mercurio y bajas recuperaciones se atribuyen también a este comportamiento [6].

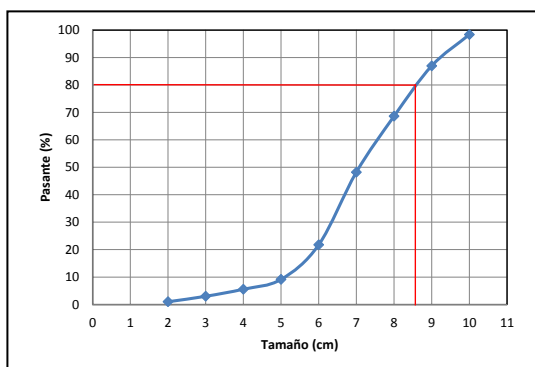


Figure 5. Estimación del tamaño de partícula del material no molido en el tambor amalgamador

#### IV. CONCLUSIONES

El proceso empleado en la recuperación de oro se desarrolló mediante una etapa de preparación del mineral que comprende la trituración manual, seguida de una molienda y posteriormente la adición de mercurio para la amalgamación.

La distribución de mercurio en las corrientes de salida corresponde al 18,1% en la amalgama sólida, 78,4% en el mercurio recuperado al prensar la amalgama en un paño y 3,5% en las colas. Esto indica que menos de la quinta parte del mercurio se utilizó eficientemente para atrapar el mercurio en la amalgama. Por otra parte, la concentración de mercurio en los sólidos de las colas corresponde a 28,58 mg/kg que es significativamente superior al parámetro establecido para la calidad del suelo en el Anexo 2 del Libro VI del TULAS.

La recuperación de oro mediante amalgamación en el proceso estudiado es del 33,33%, con el cual se obtuvieron 2,2 g de oro. Sin embargo, el mayor contenido de oro está presente en el relave con un 60,57%. Estos resultados son un indicativo de la baja eficiencia de recuperación del proceso.

La velocidad de giro determinada es de 54 rpm, que es 1,5 veces mayor a la recomendada de 35,6 rpm de acuerdo al criterio de la velocidad crítica para molinos de bolas. Esto repercute en una baja eficiencia en la molienda y en la amalgamación.

#### REFERENCIAS

- [1] K. Telmer and M. Veiga, "World emissions of mercury from artisanal and small scale gold mining" in Mercury Fate and Transport in the global atmosphere, N. Pirrone and R. Mason, Springer Science, 2009.
- [2] PRODEMINCA, "Monitoreo ambiental en las áreas mineras en el sur del Ecuador 1996-1998", 1999.
- [3] Equipo MMSD América del Sur, "Minería, minerales y desarrollo sustentable en América del Sur", 2001.
- [4] INIGEMM, "Evaluación y diagnóstico preliminar de una planta de beneficio de minerales por amalgamación en el distrito minero de Portovelo, Proyecto de mejoramiento de las condiciones de trabajo de la pequeña minería y minería artesanal", 2013.
- [5] INIGEMM, "Evaluación y diagnóstico preliminar de una planta de beneficio de minerales por amalgamación en el distrito minero de Ponce Enríquez, Proyecto de mejoramiento de las condiciones de trabajo de la pequeña minería y minería artesanal", 2013.
- [6] R. Contreras J. Pinzón, "Propuesta de manejo integrado del mercurio en el proceso de amalgamación en Vetas y California (Departamento de Santander, Colombia)" en Jornada Internacional sobre el Impacto Ambiental del Mercurio Utilizado por la Minería Aurífera Artesanal en Iberoamérica, 2001.
- [7] P. Velásquez-López, M. Veiga, y K. Hall, "Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador", Journal of Cleaner Production, 18, 226-232, 2010.
- [8] Ministerio del Ambiente, "Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria", Libro VI, Anexo 2: Norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados, Tabla 2, 2002.
- [9] Ministerio de Minas y Energía, "Producción más limpia en la minería del oro en Colombia. Mercurio, cianuro y otras sustancias", 2007.
- [10] Corporación OIKOS, "Manual de auditoría ambiental para las actividades de beneficio de minerales auríferos", 2000.
- [11] B. Wills and T. Napier-Munn, "Mineral Processing Technology" 2006.