

Alternativas de sustitución y reducción del uso de mercurio en la minería artesanal de Madre de Dios

Alternatives to substitute and reduce the use of mercury in artisanal mining in Madre de Dios

Paola Angela Torre Ureta^{1,a}, Leydi Laura Hurtado Ramírez^{1,b}, Jorge Enrique Dextre Minaya^{1,c}, Lizandro Fabio Porles Gutti^{1,d}, Vanessa Evelyn Rujel Rubio^{1,e}, Aladino Medina Benavides^{1,f}, Katiana Fretel Pichardo^{1,g}, Jorge Luis Reyna Carbajal^{1,h}, Alberto Huiman Cruz^{1,i}

Recibido: 20/05/2022 - Aprobado: 13/10/2022 – Publicado: 31/12/2022

RESUMEN

Existen elevadas concentraciones de mercurio vaporizado más allá de lo permisible en zonas del departamento de Madre de Dios, producto de la minería aurífera, se estima que este departamento produce el 70% del oro de la minería artesanal del país, las que se amparan en la Ley N° 27651 Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal y su Reglamento Decreto Supremo N° 013-2002-EM; pero que ocasionan problemas ambientales y problemas en la salud de mineros artesanales que lo usan para la amalgamación y obtención del oro. Con el objetivo de revisar, resumir y analizar la información disponible sobre alternativas de sustitución y reducción del uso del mercurio (Hg) en la minería artesanal; se demostró que existen métodos que presentan maneras más efectivas de concentración del oro, tales como la reducción de mercurio durante la amalgamación; para ello se emplea dispositivos con el fin de capturar el mercurio, o el empleo de procesos que sustituyen el mismo. Estando sujeto su viabilidad a condiciones de la zona, asesoramiento especializado, buen sistema de gestión ambiental y pautas de optimización.

Palabras claves: metilmercurio, minería artesanal, oro aluvial, reducción, sustitución.

ABSTRACT

There are high concentrations of vaporized mercury beyond what is permissible in areas of the department of Madre de Dios, product of gold mining, it is estimated that this department produces 70% of the gold from artisanal mining in the country, which are covered by the Law No. 27651 Law for the Formalization and Promotion of Small-scale Mining and Artisanal Mining and its Regulations Supreme Decree No. 013-2002-EM; but that cause environmental problems and health problems for artisanal miners who use it for amalgamation and obtaining gold. With the objective of reviewing, summarizing, and analyzing the available information on substitution alternatives and reduction of the use of mercury (Hg) in artisanal mining; it was shown that there are methods that include more effective ways of concentrating gold; for this, devices are used to capture mercury, or the use of processes that replace it. Its viability being subject to conditions in the area, specialized advice, a good environmental management system and optimization guidelines.

Keywords: methylmercury, artisanal mining, alluvial gold, reduction, substitution.

1 Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Unidad de Posgrado. Lima, Perú

a Autor para correspondencia: Paola.torre@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7054-5490>

b E-mail: Leydi.hurtado@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6182-559X>

c E-mail: jorge.dextre1@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4423-133X>

d E-mail: 10160048@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9070-6220>

e E-mail: vanessa.rujel@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5273-010X>

f E-mail: aladino.medina@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7385-028X>

g E-mail: Katiana.fretel@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2363-9304>

h E-mail: jorge.reyna3@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9955-7332>

i Docente. E-mail: ahuimanc@unmsm.edu.pe – ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5507-9903>

I. INTRODUCCIÓN

La minería es una actividad económica del sector primario, el cual consiste en la extracción de minerales. En nuestro país, la minería tiene naturaleza polimetálica, fundamentalmente de metales básicos no ferrosos (Cu, Zn, Pb, Sn) y preciosos (Au, Ag). A su vez, la minería en el Perú se clasifica tanto en dimensión y producción en: Gran Minería, Mediana Minería, Pequeña Minería y Minería Artesanal; siendo de gran importancia la minería aurífera por los altos precios del oro, según los diferentes métodos de obtención de oro (recuperación) son de tipo artesanal y mecanizado, con recuperación promedio de aproximadamente un 60%, por distintos métodos de explotación.

En el departamento de Madre de Dios, desde los años 80, la minería artesanal es una actividad que ha cobrado fuerza, pero se presenta de manera informal mayoritariamente debido migraciones a zonas con filiación aurífera por los altos precios de venta; esto fue provocado por el contexto económico de recesión, impacto al campo, problemas políticos relacionadas a la violencia por el terrorismo. En el año 2002, la Ley N° 27651- “Ley de formalización y promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal” (SINIA, 2002) y su reglamento - D.S. N° 013-2002-E.M (MINEM, 2002) se dio a conocer un marco normativo que reconoce y define oficialmente a la minería artesanal e informal, así como las condiciones básicas para la incorporación de estas actividades a la formalidad (Tovar Jumpa et al., 2005).

El departamento de Madre de Dios produce el 70% del oro de la minería artesanal del país (Kathia Romero et al., 2005), esta se caracteriza por ser intensiva en mano de obra y emplear mínima cantidad de equipo, desarrollando filones o vetas de espesor reducido y alta ley (MINEM), con una recuperación en tres etapas: recuperación propiamente dicha, amalgamación y refogado del amalgama oro-mercurio; para ello, se hace uso de los recursos agua en grandes cantidades, e instrumentos como bateas, alfombras, canaletas cubierta de yute para que la amalgama sea exprimida con el fin de extraer el exceso de mercurio, resultando en la perla de amalgama Hg + Au (60% de Hg y 40% de Au). La perla obtenida es cubierta por papel y situado en una lata de atún, para posteriormente dirigirlo a las brasas, resultando oro-refogado, se utiliza aproximadamente 2.8 kg de mercurio por cada kilo de oro (Silva & Flores, 2005). El elemento del mercurio es usado para la extracción del oro, llamado amalgamación, explicándose de la siguiente manera: $Au(s) + Hg(l) \rightarrow AuHg(l)$ (Blesa & Castro, 2015).

La extracción en pequeña escala de oro artesanal emite a la atmósfera más de 700 toneladas anuales de mercurio, y dispone 800 toneladas al suelo y al agua, siendo así el sector con mayor generación antropogénica de mercurio (PNUMA, 2015). En América Latina, la minería artesanal aurífera de amalgamación de mercurio es una de las principales fuentes de emisión de mercurio al ambiente, con un volumen estimado de 200 toneladas al año; no menos de 1,0 g de mercurio es usado para obtener 1,0 g de oro (Veiga & Meech Ambio, 1995).

La acción antropogénica a nivel de la región de Madre de Dios (principalmente por las actividades de minería informal y la deforestación), en asociación con las elevadas temperaturas y radiación solar de la zona, producen un incremento de mercurio en el medio atmosférico. El mercurio es aquel único metal que permanece en estado líquido a una temperatura ambiente, asimismo, y a 25 °C posee una densidad de 13.456 g/ml; además, a condiciones de 20 °C y presión de 0,00212 mm Hg en un ambiente cerrado emana vapores que saturan y superan el valor máximo permitido para la exposición ocupacional (Español Cano, 2012), siendo el metilmercurio, un residuo liberado por la quema del amalgama y con alta afinidad por la materia orgánica, siendo capaz de ser ingeridos por seres vivos, tales como peces, pudiendo impactar al ambiente y la población.

Un tercio de todas las emisiones antropogénicas de mercurio en todo el mundo son de origen artesanal; su uso no técnico e indiscriminado constituye un alto riesgo para el medio ambiente, debido a los efectos que ha presentado la población dedicada a la minera en su salud, aquella población en el área de influencia directa e indirecta de las operaciones mineras, y la consecuente incorporación del metal a la cadena alimenticia; su presencia en sedimentos, sólidos en suspensión y peces dentro del río Madre de Dios de nuestro país son elevados en relación con las ubicaciones aguas arriba de la minería; más de un tercio de los peces carnívoros exceden el estándar internacional de salud de 0.5 mg kg⁻¹.

El 2 de junio del año 2000, el derrame de mercurio metálico generado por la minera Yanacocha en el departamento de Cajamarca generó impacto al ambiente y afectó la salud de más de mil campesinos, quienes, años después, siguen sufriendo las consecuencias en su salud. Niños fueron los mayores afectados por el derrame, debido a que recogieron el metal con sus manos sin protección alguna, desconociéndose los efectos adversos. Por parte del Ministerio de Salud, se presentaron falencias y carencia de expertiz sobre la toxicología del metal en cuestión. Hubo factores que agravaron los efectos del accidente, tales como la pobreza extrema que atravesaban la población; en relación a la población afectada, el 80% era de zona rural, mientras que el 74.9% no poseía nivel de instrucción alguna o solo curso el nivel primario (Arana-Zegarra, 2009).

En Madre de Dios, la intoxicación por mercurio se ha convertido en un problema que no solo afecta a la salud de aquellos directamente afectados por la actividad minera, sino a aquellos que se ven afectados por la contaminación de las aguas, tierras, peces, entre otros; el impacto de mercurio ha pasado a ser un problema serio para el ambiente, el cual se produce de dos maneras: (1) contaminación al medio acuático por su emisión en estado líquido, debido a la amalgamación del oro y la consecuente disposición de los residuos a los ríos y (2) contaminación al medio atmosférico por la emisión de vapores debido a la quema de amalgama para concentrar el oro (Osores, Guerrero & Grández, 2009). En Madre de Dios, más de 180 toneladas al año de mercurio son desechados y emitidos al suelo, aire y agua, de acuerdo con la investigación realizada por la ONG canadiense Artisanal Gold Council (Escobar, 2018). Por lo

que se debería plantear la implementación de estrategias efectivas y viables de intervención que busquen disminuir y reducir el uso del mercurio en la minería artesanal de Madre de Dios.

El presente artículo tiene el objetivo de revisar, resumir y analizar la información disponible sobre las alternativas de sustitución del uso del mercurio (Hg) en la minería artesanal en el departamento de Madre de Dios del Perú.

II. MÉTODOS

La investigación fue básica de tipo exploratoria utiliza el método cualitativo y de revisión sistemática; por lo cual, se hizo elección de investigaciones que presenten alternativas viables de sustitución del uso de mercurio en la minería artesanal en los diferentes buscadores académicos. Asimismo, la actual investigación tiene rigor científico.

III. RESULTADOS

Los resultados de la presente investigación se muestran a continuación.

3.1. Técnicas gravitacionales

3.1.1. Concentradores

La concentración gravimétrica tiene como objetivo principal «*la separación de oro u otros minerales, para ello se pueden emplear diferentes metodologías que basan sus principios de operación en las fuerzas de gravedad y su interacción con fuerzas hidráulicas, de fricción, diferencias de densidades y/o peso específico*» (Castillo, p.26, 2018). Como el Concentrador Falcón, que según Vidal Rojas et al. (2010) es capaz de rescatar aquellas partículas liberadas ultrafinas, y separarlas haciendo uso de campos centrífugos, con equipos con operatividad mayor a 95%, con mantenimiento bajo y cuya operación es simple.

El concentrador Icon i150 hace uso de la tecnología concentrador FALCON, este concentra minerales libres y finos bajo el principio del campo centrífugo; esos minerales no pueden ser recuperables utilizando las técnicas de la minera artesanal o de pequeña escala (PNUD et al., 2017). El concentrador Falcon se presenta como una alternativa a los minerales auríferos que presentan oros libres, siendo satisfactorio en el empleo por mineras alrededor del mundo, debido al método de preconcentración. En así como en la exposición llamada “*Nuevas aplicaciones de Concentración centrífuga*” realizada por Kleek (2006) en el Simposium de Mineralurgia desarrollada en Tescup, presenta que el depósito Elvington ubicada en Zimbabwe, presento un éxito con el uso de solo el concentrador centrífugo Falcón, alcanzando el 70% de recuperación total del oro; asimismo, los resultados fueron positivos en minas de minas de Ridgeway, Munki y Telfer, en Australia (Palomino & Ramos, 2008).

En el estudio “*Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia*” se usó el concentrador Falcón y el relave del proceso de amalgamación; para encontrar procesos metalúrgicos

de separación en la primera etapa como la gravimetría – centrifugación y la cianuración en la segunda etapa, para mejorar la recuperación de oro y mercurio; concluyendo que el relave de amalgamación tiene una buena ley de oro de 16.16 g/TC, como cabeza promedio calculada y 3.64 ppm de mercurio, siendo conveniente realizar primero un preconcentración con el concentrador Falcón, seguida de la cianuración para obtener buenas recuperaciones, para lo que la muestra debe ser remolida (Aramburú Rojas et al., 2010), su adaptabilidad en la minería artesanal de Madre de Dios va a requerir de estudios previos, considerando que el presente estudio fue realizado con material proporcionado por los mineros artesanales del distrito de Lomas, del departamento de Piura.

La Dirección de Geología y Minas de Costa Rica realizo una investigación sobre el uso de tecnologías de gravimetría con el fin de encontrar un sustituto al uso de mercurio en el proceso de recuperación el oro en la minería artesanal. Para ello, se extrajo 8 muestras de 20 kg cada una de material con oro libre, el cual se trituró para obtener el tamaño adecuado (<2mm o malla de 10), las que fueron corridas en un concentrador de laboratorio equivalente al concentrador iCON-i150; obteniendo resultados de 14,3% al 65,7 % en los concentrados y las colas. Estos valores son superiores a lo que normalmente es obtenido con mercurio; es por ello que por recomendación se debe tener la información del ambiente geológico y de la mineralización del material a procesar con el fin de tener los parámetros correctos en los concentradores y así una mayor eficiencia (PNUD et al., 2017).

3.1.2. Centrifugadoras

Las centrifugadoras consisten en un tazón giratorio con una serie de crestas que al girar atrapan el oro del material (mena molida, concentrado de mineral pesado, arenas aluviales, etc.) provocando la separación de los minerales ligeros del oro, siendo más efectiva que otros sistemas. Por lo general, en el sistema entra la mena como una pulpa semi-líquida (60-75% agua y 40-25% de sólidos), y en el tazón giran aquellas partículas más pesadas, entre estas el oro, que es atrapado por la cresta, mientras las otras son expulsadas con ciclos de operación de 0.5 a 2 horas para las centrifugas pequeñas, que al terminar el concentrado debe ser removido de las crestas (PNUMA, 2015).

El uso la centrifuga es necesario que el tamaño de la pulpa que entra al sistema sea uniforme, se tenga un acceso al agua y energía constante y un capital económico alto; debiéndose calibrar de acuerdo al tipo de mena y adaptar el tamaño del grano que ingresa al sistema, la velocidad con la que se alimenta, rota y dura el ciclo. Un gran inconveniente es la mantención del concentrado activo, para que se garantice el reemplazo de las partículas ligeras por las de oro (PNUMA, 2015).

3.1.3 Mesas Gravimétricas

En la “*Propuesta de cambio tecnológico para sustitución del proceso de amalgamación con mercurio en plantas de beneficio de oro a pequeña escala*” (Ruiz, 2016), se evaluaron una serie de opciones tecnológicas, como es el uso de la mesa de concentración gravimétrica Wiffley, marca Ohta Kikai Seisakusho Co. Durante el proceso el tenor de la

cabeza fue de 76,84 g/T, mostrando recuperación del 32% de Au, parecido al rendimiento más bajo en la Amalgamación. El porcentaje de recuperación presentado es coherente con el análisis mineralógico, toda vez que la recuperación del oro libre en los sulfuros presenta gran dificultad.

3.2. Flotación espumante

La flotación espumante consiste en sumergir el oro a un medio cuya densidad es consabido, con el fin de que aquellas partículas de densidades específicas flotan sobre una espuma generada, y las demás, decantan; El fenómeno fisicoquímico llamado flotación comprende fases tales como sólido – gas, líquido – gas y/o líquido – líquido, asimismo, aquellas partículas de minerales hidrofílicos establecen enlaces con los iones de agua a causa de la humectación en el medio acuoso, provocando así su sedimentación. Sin embargo, las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire, yendo en forma de espuma mineralizada hacia la superficie. Cuando se presenta que el mineral no es capaz de flotar naturalmente, es necesario la aplicación de reactivos químicos surfactantes con el fin de inducir una hidrofobicidad selectiva en las partículas, favoreciendo a la adherencia mineral-burbuja (Castillo, 2018).

3.3. Proceso de cianuración

El proceso de cianuración representa un método alternativo para eliminar el riesgo de contaminación por mercurio, dado que el cianuro es biodegradable y menos peligroso para el ambiente (MINEM), lograría ajustarse a la minería de menor escala, siendo el caso de la minería artesanal es el Vat Leaching. Esta operación metalúrgica consiste previamente en chancado y molienda, para proceder con la aglomeración, que consiste en el mezclado del mineral con cemento y cal (con la finalidad de darle alcalinidad a la mezcla). La proporción de uso de cemento equivale a 12 kg por tm de mineral; respecto a la cal, depende de la acidez del mineral, oscila en proporción de 1 kg por tm de mineral. Luego de obtener la mezcla, se procede a humedecer con la solución de cianuro a un 80%, el resto del porcentaje se agrega en los siguientes días. Finalmente, se deja el material en reposo en una poza acondicionada, con el objetivo de que se dé la reacción de disolución del oro en un ambiente aeróbico. Por lo general, no transcurren más de 24 horas, de que la poza este llena, en su tiempo de reposo, observando en esta etapa la disolución del 90% del oro; el 10% lo hará en el tiempo restante (Flores Mamani, 2019).

La propiedad que posee el oro de la disolución en soluciones diluidas de cianuros es causante del gran impacto del proceso de cianuración a nivel industrial en relación a la elección del método que promueva inversión en el proceso (Flores Mamani, 2019).

3.4. Uso del bórax

Existe la opción del reemplazo del mercurio en la producción del oro, el bórax, sustancia de baja toxicidad, con dosis letal de 2.66 g/kg peso corporal. Para su uso, se siguen tres pasos: «1. Trituración y pulverización del mineral. 2. Preconcentración 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» (Eppers, p. 3, 2017).

Se han realizado ensayos para comparar el proceso clásico con el uso del bórax, demostrando que el uso de esta sustancia supera a la amalgamación en relación con la recuperación y reducción del tiempo empleado, las pruebas en Bolivia arrojaron que el tiempo utilizado para la concentración con canaleta y la fusión con bórax era un 10% menos en comparación con la amalgamación directa del mineral. Entre las ventajas que se presentan es las pocas modificaciones que se deben realizar a la indumentaria utilizada en la pequeña minería y minería artesanal; asimismo, se presenta un mayor porcentaje de recuperación del oro (grueso y fino) (Eppers, 2017).

En el departamento de Arequipa, va en aumento la cantidad de mineros que hacen uso del bórax para la extracción del oro, demostrando la facilidad del método, la poca inversión, mayor recuperación de oro y el menor riesgo al ambiente y a la salud de la población. La ARMA, en cooperación con la GIZ y la Universidad Mayor de San Agustín de Arequipa (UNSA), están programando la demostración de ventajas del uso del bórax ante el mercurio y cianuro. No obstante, a la actualidad, no se presenta información de empresas que estén aplicando el método a nivel nacional (Eppers, 2017).

3.5. Fusión con pretratamiento ácido nítrico y bórax

Un método de sustitución del mercurio para la obtención del oro en la minería artesanal consiste en someter el oro a una combinación con ácido nítrico (HNO_3) y a una fuente de calor que eleve la temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición, de tal manera que se logre obtener una masa de color blanco. Seguidamente, la masa obtenida se funde con bórax mediante un soplete, de esta manera se obtiene el oro, cuya aplicación sustituye al mercurio en la minería artesanal (Lozada, 2019)

3.6. Uso de retorta en el proceso de refogado

Como se ha ido mencionando en el desarrollo de la presente investigación, el mercurio causa grave daño a la salud de las personas, quienes lo manipulan sin ninguna protección, o cuando es vertido al ambiente, generando la bio acumulación del mismo. Una alternativa para reducir el consumo de mercurio en la obtención del oro en la minería artesanal es el empleo de hornos de retorta. El funcionamiento consiste en lograr la separación del oro de la amalgama y la labor en un circuito cerrado, con la finalidad de evitar la propagación de gases o vapores de mercurio al ambiente (Tovar Jumpa et al., 2005).

3.7. Máquina ECO-100V

En la página web oroyfinanzas.com se muestra a los equipos Oro ECO-100V y Oro ECO-100H que han sido probados en Madre de Dios, con la finalidad de no incluir al mercurio y cianuro en el proceso de extracción. De los resultados, se presentó que se recuperó el 95% del oro presente en arenilla negra, se hizo uso de reactivos no contaminantes, el 90% del agua usado en el proceso se recircula, se consume 0,2 gal de gasolina por ciclo productivo, presenta alta resistencia a la abrasión y corrosión; todo ello permite el incremento de la rentabilidad al ser de 100 litros de capacidad y un costo de 4,500 dólares por el equipo.

IV. DISCUSIÓN

Analizando cada una de las posibles alternativas de sustitución y reducción del uso del mercurio en la minería artesanal en el departamento de Madre de Dios, se descarta el método de fusión con bórax, toda vez que, su uso no es apropiado para todos los tipos de minerales auríferos, y se muestra limitaciones con aquellos mineros cuya granulometría de oro es ultra – fina o contienen alto índice de sulfuro (Eppers, 2017); por lo que, para aplicarlo en Madre de Dios, se requiere de mayores investigaciones, con la finalidad de determinar la metodología, debido a que depende de la composición mineralógica.

Asimismo, el uso del concentrador gravimétrico para la recuperación de oro y otros minerales, es una buena alternativa de sustitución, según Lobe (2018) este concentrador es adecuado para la concentración de minerales pesados por su diferencia de peso específico, asimismo, no demanda de sustancias tóxicas para la recuperación de magnetita y el oro libre; existen 30 unidades a nivel nacional, siendo necesario para su funcionamiento: agua y energía eléctrica. Por otro lado, según Hinojosa (2016), el oro posee un elevado peso específico (19,3 g/cm³), contrario a otros minerales; esa característica permite que pueda ser separado a pesar del tamaño de partículas; el éxito de las técnicas está directamente relacionado con la granulometría y la forma de las partículas de oro obtenidas en la etapa de molienda.

En la minería industrial y artesanal es apropiado la aplicación de la combinación de procesos gravimétricos con cianuración, con el fin obtener un concentrado con alta recuperación mejorando los procesos gravimétricos; se recupera el oro libre grueso (fundición directa) y el resto se lixivia con cianuro (agitación), posterior a molerlo más fino y no siendo necesario la amalgamación (Chaucayanqui, 2012). Por lo tanto, el uso del concentrador Falcón apuntan a sustituir el proceso de amalgamación y reemplazarlo con un proceso combinado de preconcentración con el concentrador Falcón – Cianuración, partiendo desde el mineral fresco; en el que se usaron muestras del departamento de Piura, en donde la caracterización mineralógica del oro es diferente al de presente en Madre de Dios, por lo que se requiere de ensayos técnicos y evaluaciones de rentabilidad y sostenibilidad.

Las técnicas gravimétricas, según la granulometría del oro de Madre de Dios, son la mejor alternativa en cuanto a eficiencia y costos de producción. El Modelo de Sostenibilidad Minero Artesanal de oro (MSMA), según González (2019) es «establecido con la determinación cualitativa de la sostenibilidad en sus componentes, subcomponentes y acciones la cual incluye la valoración sostenible del modelo y en la praxis como propuesta de negocio sostenible» (p. 142). El análisis de la sostenibilidad de los indicadores ambientales es determinante para la cuantificación del presente modelo, con el fin de presagiar el avance óptimo de los indicadores de sostenibilidad (González Torres, 2019).

En la Tabla 1, se muestra la relación de equipo, los cuales pueden ser utilizados según la caracterización y composición mineralógica del depósito aurífero, con las

partículas de diferentes tamaños. Los equipos pueden ser clasificados en (1) estacionarios tales como conos, canaletas con rifles y espirales, y (2) equipos móviles tales como centrifugas, mesas concentradoras y jigs (Concha Rodríguez, 2007)

Tabla 1. Rango de operación de equipos de concentración gravimétrica

Equipo	Tamaño de partícula
JIG (pulsadora de laboratorio)	0,08 mm – 100 mm
Mesa Vibratoria	0,02 mm – 2 mm
JIG Neumático	0,1 mm – 25 mm
Mesa de Aire	0,25 mm – 6 mm
Centrifugas	0,01 mm – 12 mm
Espiral	0,05 m – 2 mm

Fuente: Estudio de la concentración gravimétrica de minerales auríferos en un jig de laboratorio (Concha Rodríguez, 2007).

Por otro lado, existe cierto temor por el reemplazo del mercurio por parte de los mineros pequeños y artesanales creando incertidumbre por la utilización de nuevas tecnologías, debido a que expertise de su manipulación generalizada por años, por los costos, e inquietud a no poder desarrollarla de la mejor manera; por lo cual, el uso de este metal se ha convertido en algo cultural. En consecuencia, se hace necesario un campo de manera de pensar por parte de los mineros pequeños y artesanales, en relación con las nuevas tecnologías y sus ventajas, y así difundirlo libremente y sin restricciones (Lozada, 2019).

V. CONCLUSIONES

De la información recopilada, investigada y citada, se concluye que, si existen alternativas para sustituir y reemplazar el uso del mercurio para la obtención del oro en la minería artesanal y pequeña, presentándose como alternativa las técnicas gravimétricas, cuya tecnología permite la reducción de impactos ambientales. No obstante, se presentan desafíos en su implementación, tales como costos elevados asumidos por el Gobierno Nacional y las poblaciones que ejercen la minería artesanal.

La sustitución del uso del mercurio en la minería artesanal del departamento de Madre de Dios donde la extracción del oro aluvial viene desarrollándose en forma informal e ilegal, es un proceso que requiere de alta inversión en equipos gravimétricos de alta tecnología y que ameritan la inducción y socialización del uso y ventajas comparativas.

5.1 Recomendaciones

Se recomienda el fortalecimiento de la legislación nacional en relación con su aplicación y formulación de nuevos proyectos los cuales impulsen la producción, inversión y generación y/o implementación de nuevas alternativas tecnológicas con el fin de evitar el uso del mercurio en los procesos mineros. Asimismo, en el aspecto social, es necesario las capacitaciones a las comunidades que ejercen la actividad minera con el fin de concientizar sobre las nuevas opciones y sus beneficios en el ámbito laboral, ambiental y salud.

Por último, es de crucial importancia el de realizar investigaciones sobre las consecuencias de la actividad minera artesanal en cuanto a la afectación del ambiente, y cómo se puede mitigar ello. Asimismo, desarrollar métodos de remediación para lograr restaurar los ecosistemas expuestos al Hg.

VI. AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero agradecimiento a la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a la Facultad de ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, a los docentes, compañeros de estudios de la maestría en Gestión Integrada en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente; que nos brindaron su apoyo moral e intelectual de manera incondicional, por la amistad surgida. A todos ellos gracias. Al docente Dr. Alberto Huiman, por habernos apoyado con su amplia experiencia profesional en las correcciones correspondientes de nuestro trabajo de investigación y su entusiasmo como persona para finiquitar esta labor emprendida.

VII. REFERENCIAS

- Aramburú Rojas, V. S., Núñez, P., Azañero Ortiz, Á., Figueroa, M., & Gagliuffi, P. (2010). Recuperación de oro y mercurio de los relaves del proceso de amalgamación con tecnología limpia. *Revista Del Instituto de Investigación de La Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 13(25), 13–19. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v13i25.368>
- Blesa, M. A., & Castro, G. D. (2015). *Historia natural y cultural del mercurio: Vol. 1a ed.* http://aargentiniapciencias.org/wp-content/uploads/2017/10/libro_historia_natural_cultural_mercurio.pdf
- Concha Rodríguez, H. I. (2007). *Estudio de la concentración gravimétrica de minerales auríferos en un jig de laboratorio* [Universidad de Valle]. <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/handle/10893/9875/CB-0343306.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Escobar, R. (2018). *Los alarmantes niveles de mercurio en Madre de Dios*. Mongabay Latam. <https://es.mongabay.com/2018/08/peru-mercurio-en-madre-de-dios/>
- Español Cano, S. (2012). Contaminación con mercurio por la actividad minera. *Biomédica*, 32(3), 309–311. <https://doi.org/10.7705/BIOMEDICA.V32I3.1437>
- Flores Mamani, C. V. (2019). *Estudio del proceso de cianuración de minerales auríferos para la recuperación de oro en el proyecto Oropesa, La Rinconada – Puno* [Universidad Nacional del Altiplano]. http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/13931/Flores_Mamani_Carlos_Victor.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- González Torres, M. A. (2019). Modelo de sostenibilidad de la minería artesanal de oro para el desarrollo local del distrito de Chala, Arequipa. *Universidad Nacional Mayor de San Marcos*. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/10901>
- Kathia Romero, M., Hugo Pachas, V., Zambrano, G., & Guarniz, Y. (2005). Formalización de la minería en pequeña escala en América Latina y el Caribe: Un análisis de experiencias en el Perú. *CooperAcción*, 1–116. <https://idl-bnc-idrc.dspacedirect.org/bitstream/handle/10625/25877/121463.pdf>
- Lozada, D. (2019). *Sustitución del mercurio por fusión con pre-tratamiento ácido*. Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. https://www.researchgate.net/publication/330764805_SUSTITUCION_DEL_MERCURIO_POR_FUSION_CON_PRE-TRATAMIENTO_ACIDO_REPLACING_THE_MERCURY_BY_FUSION_WITH_ACID_PRETREATMENT_1_RESUMEN
- MINEM. (2002). *Decreto Supremo N° 013-2002-EM. Aprueba el Reglamento de la Ley de Formalización y Promoción de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal*. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueba-reglamento-ley-formalizacion-promocion-pequena-mineria-mineria>
- PNUMA. (2015). *Elaboración de un plan de acción nacional para reducir y, cuando sea posible, eliminar el uso del mercurio en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala (Convenio de Minamata sobre el Mercurio)*. Programa de Las Naciones Unidas Para El Medio Ambiente. https://www.nrdc.org/sites/default/files/int_16032101d.pdf
- SINIA. (2002). *Ley N° 27651 de formalización y promoción de la Pequeña Minería y Minería Artesanal*. Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-formalizacion-promocion-pequena-mineria-mineria-artesanal>
- Tovar Jumpa, O., Sánchez E., W., & García Alvarez, C. (2005). *Implementación y uso de la retorta en el proceso de refogado*. Dirección de Promoción y Desarrollo Minero-MINEM. <https://www.yumpu.com/es/document/read/12894702/implementacion-y-uso-de-la-retorta-en-el-proceso-de-refogado>
- Veiga, M. M., & Meech Ambio, J. A. (1995). Gold Mining Activities in the Amazon: Clean-Up Techniques and Remedial Procedures for Mercury Pollution. *Ambio*, 24(6), 371–375. <https://www.jstor.org/stable/4314369>

Contribución de autoría

Conceptualización: Alberto Huiman Cruz

Curación de datos: Paola Angela Torre Ureta, Leydi Laura Hurtado Ramírez, Jorge Enrique Dextre Minaya, Lizandro Fabio Porles Gutti, Vanessa Evelyn Rujel Rubio, Aladino Medina Benavides, Katiana Fretel Pichardo, Jorge Luis Reyna Carbajal, Alberto Huiman Cruz.

Análisis formal: Paola Angela Torre Ureta, Leydi Laura Hurtado Ramírez, Jorge Enrique Dextre Minaya, Lizandro Fabio Porles Gutti, Vanessa Evelyn Rujel Rubio, Aladino Medina Benavides, Katiana Fretel Pichardo, Jorge Luis Reyna Carbajal, Alberto Huiman Cruz.

Investigación: Paola Angela Torre Ureta, Leydi Laura Hurtado Ramírez, Jorge Enrique Dextre Minaya, Lizandro Fabio Porles Gutti, Vanessa Evelyn Rujel Rubio, Aladino Medina Benavides, Katiana Fretel Pichardo, Jorge Luis Reyna Carbajal, Alberto Huiman Cruz.

Metodología: Alberto Huiman Cruz

Administración del proyecto: Paola Angela Torre Ureta, Leydi Laura Hurtado Ramírez, Jorge Enrique Dextre Minaya, Lizandro Fabio Porles Gutti, Vanessa Evelyn Rujel Rubio, Aladino Medina Benavides, Katiana Fretel Pichardo, Jorge Luis Reyna Carbajal, Alberto Huiman Cruz.

Supervisión: Alberto Huiman Cruz

Validación: Alberto Huiman Cruz

Visualización: Alberto Huiman Cruz

Redacción - borrador original: Paola Angela Torre Ureta, Leydi Laura Hurtado Ramírez, Jorge Enrique Dextre Minaya, Lizandro Fabio Porles Gutti, Vanessa Evelyn Rujel Rubio, Aladino Medina Benavides, Katiana Fretel Pichardo, Jorge Luis Reyna Carbajal, Alberto Huiman Cruz.

Redacción - revisión y edición: Paola Angela Torre Ureta, Leydi Laura Hurtado Ramírez, Jorge Enrique Dextre Minaya, Lizandro Fabio Porles Gutti, Vanessa Evelyn Rujel Rubio, Aladino Medina Benavides, Katiana Fretel Pichardo, Jorge Luis Reyna Carbajal, Alberto Huiman Cruz.