

Recuperación de oro aluvial mediante mesa gravimétrica como alternativa al uso de mercurio en Madre de Dios

Alluvial gold recovery by gravimetric table as an alternative to the use of mercury in Madre de Dios

Marcelino Vargas Quea^{1,*}

¹Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.

Resumen

La minería artesanal de oro aluvial en Madre de Dios presenta limitaciones técnicas significativas para la recuperación de partículas finas ($< 75 \mu\text{m}$), atribuibles al uso empírico de mesas gravimétricas sin una adecuada configuración de variables operativas. Este estudio evaluó el efecto del tamaño de partícula, el caudal de agua y la pendiente de la mesa gravimétrica sobre la eficiencia de recuperación de oro en concentrados de esclusas, mediante un diseño factorial 2^3 y análisis de varianza (ANOVA). Las pruebas experimentales, realizadas con muestras representativas de tres concesiones mineras del corredor minero, revelaron que tanto el tamaño de partícula como el caudal de agua influyen de manera altamente significativa en la recuperación de oro ($p < 0,001$), mientras que la pendiente mostró efectos relevantes solo en interacción con tamaño de partícula de oro y caudal de agua. Se alcanzó una recuperación máxima del 86,98 % al optimizar simultáneamente las tres variables, siendo la fracción granulométrica de 105 – 250 μm la que presentó mayor concentración de oro. Los resultados evidenciaron que pendientes mal calibradas y caudales inadecuados favorecen la pérdida de oro fino en los relaves, limitando el rendimiento de la mesa gravimétrica. En este contexto, la mesa gravimétrica se valida como una alternativa técnica viable al uso de mercurio, siempre que se realice una adecuada calibración operativa. En conclusión, la optimización conjunta de los parámetros operativos mejora significativamente la eficiencia de la concentración gravimétrica, aportando a la transición hacia una minería artesanal más limpia, segura y sostenible en la Amazonía peruana.

Palabras clave: Concentrado, concentración gravimétrica, esclusas, mesa gravimétrica, oro.

Abstract

Artisanal alluvial gold mining in Madre de Dios has significant technical limitations for the recovery of fine particles ($<75 \mu\text{m}$), attributable to the empirical use of gravimetric tables without an adequate configuration of operating variables. This study evaluated the effect of particle size, water flow and gravimetric table slope on gold recovery efficiency in lock concentrates, using a 2^3 factorial design and analysis of variance (ANOVA). The experimental tests, carried out with representative samples from three mining concessions of the mining corridor, revealed that both particle size and water flow have a highly significant influence on gold recovery ($p < 0.001$), while slope showed relevant effects only in interaction with gold particle size and water flow. A maximum recovery of 86.98 % was achieved by simultaneously optimizing the three variables, with the particle size fraction of 105–250 μm presenting the highest concentration of gold. The results showed that poorly calibrated slopes and inadequate flows favor the loss of fine gold in the tailings, limiting the performance of the gravimetric table. In this context, the gravimetric table is validated as a viable technical alternative to the use of mercury, provided that an adequate operational calibration is carried out. In conclusion, the joint optimization of the operating parameters significantly improves the efficiency of the gravimetric concentration, contributing to the transition towards cleaner, safer and more sustainable artisanal mining in the Peruvian Amazon.

Keywords: Concentrate, gravimetric concentration, sluices, gravity table, gold.

Recibido: 19/01/2025

Aceptado: 25/02/2025

Publicado: 30/06/2025

***Autor para correspondencia:** kuea14@gmail.com

Cómo citar: Vargas Quea, M. (2025). Recuperación de oro aluvial mediante mesa gravimétrica como alternativa al uso de mercurio en Madre de Dios. *Revista De Investigaciones*, 14(2), 94-105. <https://doi.org/10.26788/ri.v14i2.6647>

Introducción

Las mesas gravimétricas en la minería artesanal de oro aluvial en Madre de Dios tienen baja eficiencia en la recuperación de partículas finas de oro ($< 75 \mu\text{m}$) debido a la falta de optimización de parámetros como tamaño de partícula, caudal de agua y pendiente. Esto reduce la productividad, aumenta la pérdida de oro en relaves y fomenta el uso de mercurio, obstaculizando una minería más limpia y sostenible.

Para extraer las partículas de oro contenidas en los concentrados de esclusa, estas deben mezclarse con agua y someterse a un proceso de separación en una mesa gravimétrica provista de rifles, donde el oro es retenido, lavado y finalmente recolectado (Falconer, 2003). Este proceso se basa en la diferencia de densidad entre el oro (19,3 g/cm³) y los minerales de ganga (2,65 g/cm³), que permite su estratificación y concentración (Martínez et al, 2021). La eficiencia de esta técnica depende de factores operativos, como el tamaño de las partículas de oro aluvial, caudal de agua alimentada y la pendiente de la mesa gravimétrica (Dominy et al, 2008).

La región de Madre de Dios, ubicada en la Amazonía sur del Perú, alberga extensos depósitos aluviales auríferos derivados de la erosión de vetas primarias de oro hospedadas en cuerpos graníticos y rocosos del Complejo Iscaybamba, así como de otras formaciones litológicas adyacentes. Estos materiales auríferos son transportados por ríos de gran energía como el Inambari, Manu y Colorado, y posteriormente depositados en terrazas y barreras fluviales, donde se acumulan en forma de placeres (Huaman-Paredes et al, 2020).

Los depósitos aluviales en esta región se caracterizan por contener oro libre de origen secundario, cuya morfología y granulometría varían considerablemente, presentándose desde partículas milimétricas hasta fracciones micrométricas ($< 75 \mu\text{m}$). La forma del oro aluvial oscila entre partículas esféricas, aplanadas y laminadas, como resultado de procesos prolongados de erosión mecánica y retrabajo sedimentario. Esta alta heterogeneidad en tamaño y forma representa un desafío técnico para su recuperación eficiente mediante procesos físicos, particularmente

aquellos basados en la concentración gravimétrica. (Huaman-Paredes et al, 2020).

El oro se encuentra comúnmente asociado a minerales de ganga tales como cuarzo, arcillas, ilmenita, hematita y goethita, los cuales conforman las denominadas “arenas negras”, ampliamente reconocidas en el contexto mineralógico regional (Huaman-Paredes et al, 2020). La presencia de estos minerales acompañantes, sumada a la abundancia de partículas finas, influye significativamente en las propiedades físicas de la pulpa, tales como la densidad aparente, la distribución granulométrica y la viscosidad. Estos factores afectan directamente el comportamiento hidrodinámico durante los procesos de concentración, exigiendo un diseño operativo adaptado a las condiciones específicas del yacimiento y del tipo de mineral tratado.

La explotación de oro aluvial en Madre de Dios se fundamenta en métodos empíricos, desarrollados y refinados por generaciones de mineros locales, los cuales se adaptan a las condiciones hidrológicas, geológicas y topográficas del entorno para maximizar la recuperación del mineral.

En las áreas de llanura aluvial, donde la actividad extractiva ocurre por debajo del nivel freático, se utiliza principalmente el método de chupadera. Este método consiste en un sistema de bombeo por succión, que emplea mangueras de entre 4 y 6 pulgadas de diámetro y motores con potencias que varían entre 35 y 180 HP, con el objetivo de extraer una pulpa (mezcla de gravas y sedimentos con agua). Posteriormente, esta pulpa es transportada a tierra firme, donde se somete a un proceso de concentración gravimétrica mediante canalones.

Por otro lado, en las terrazas elevadas del piedemonte se utiliza el método conocido como chute, que combina la excavación mecánica con labores de lavado manual o semimecanizado. La extracción de gravas auríferas se lleva a cabo con maquinaria pesada, como retroexcavadoras, cargadores frontales o volquetes. El material extraído se deposita en tolvas de dimensiones aproximadas de 5 m de largo, 4 m de ancho y 2 m de alto. Luego, las piedras gruesas son separados mediante una zaranda estática con aberturas de 1/8 de pulgada con ayuda de chorro de agua, mientras que las fracciones finas son conducidas

a los canalones recubiertos con alfombra. En esta fase se realiza la concentración gravimétrica primaria del oro, obteniéndose un concentrado conocido como arenilla negra, que es procesado posteriormente mediante mesa gravimétrica para su concentración final.

La pendiente, longitud de carrera, la frecuencia de golpes y el movimiento longitudinal de la mesa gravimétrica permite separar partículas de oro aluvial por su densidad, tamaño y forma de manera eficiente (Kannan et al., 2017). La pendiente permite que las partículas pesadas se desplacen hacia la parte inferior, mientras que las partículas ligeras son arrastradas hacia la parte superior de la mesa gravimétrica (Arief, 2022). La longitud de carrera evita que las partículas se adhieran a la mesa, permite a estratificarse y la distribución de un flujo continuo de mineral en la mesa gravimétrica (Silva et al., 1986). La combinación de la pendiente y la longitud de carrera facilita la distribución y separación efectiva de las partículas de oro aluvial según su densidad, tamaño y forma (Yadav et al., 2022).

Haga clic o pulse aquí para escribir texto. El principio de operación de la mesa gravimétrica se basa en la sedimentación diferencial. Es decir, las partículas con mayor densidad como el oro tienden a sedimentarse más rápidamente que aquellas con menor densidad. Esta diferencia es aprovechada para separar y concentrar los minerales de valor sin necesidad de usar químicos tóxicos. Cuando se alimenta la pulpa (mezcla de agua y material aurífero) en la parte superior de la mesa, las partículas más densas, como el oro, se estratifican y se desplazan en dirección opuesta al flujo del agua, mientras que las partículas más ligeras son arrastradas hacia el extremo inferior (Vieira, 2006). El equipo está conformado por una superficie plana e inclinada, por donde fluye la pulpa alimentada. Esta superficie está intersecada por rifles, que son ranuras transversales que ayudan a retener las partículas pesadas y permiten el paso de las livianas (Ulusoy & Atagun, 2023).

La inclinación, junto con un movimiento oscilatorio longitudinal o vibratorio y un flujo de agua constante y pulsante, facilita la estratificación del material, permitiendo que las partículas más densas se concentren en ciertas zonas de la mesa

(Prasetya et al., 2020). La eficiencia de este equipo radica en su capacidad de generar una separación mecánica efectiva sin recurrir a sustancias químicas, gracias a su diseño que favorece la migración diferencial de partículas según su densidad (Andò, 2020).

Una de las principales ventajas de la mesa gravimétrica frente al uso tradicional de mercurio es que permite la recuperación selectiva del oro sin el uso de químicos tóxicos, que reduce significativamente el impacto ambiental y los riesgos para la salud de los trabajadores (Veiga & Gunson, 2020).

Además, su aplicación promueve prácticas más sostenibles en la minería artesanal, al tiempo que mejora los niveles de recuperación del oro aluvial (Teschner et al., 2017).

La eficiencia de recuperación del oro aluvial mediante mesas gravimétricas está fuertemente condicionada por tres variables operacionales interdependientes: el tamaño de partícula del oro, el caudal de agua y la pendiente de la mesa gravimétrica.

El tamaño de partícula del oro tiene un efecto determinante sobre la velocidad de sedimentación. Las partículas gruesas ($> 150 \mu\text{m}$) tienden a sedimentar con mayor facilidad debido a su masa y menor relación superficie/volumen. En cambio, las partículas finas ($< 75 \mu\text{m}$) presentan mayor resistencia hidráulica y tienden a permanecer en suspensión, lo cual reduce su captación en los rifles de la mesa gravimétrica (Ferdana et al. 2018; Veiga & Gunson, 2020). Esta condición implica una pérdida significativa de oro fino en los relaves si no se ajustan las condiciones del proceso (Abbireddy & Clayton, 2009).

El caudal de agua es otra variable clave, ya que regula el arrastre hidráulico de las partículas de oro. Un caudal insuficiente provoca acumulación de ganga y pérdida de capacidad de procesamiento, mientras que un exceso de caudal de agua favorece el arrastre de partículas densas de oro junto con la ganga liviana de ganga, disminuyendo la eficiencia de separación (Li et al., 2015; Li et al., 2015; Yıldırım Gülsøy & Gülcen, 2019). Es esencial alcanzar un equilibrio entre arrastre

y sedimentación, considerando las propiedades físicas del mineral tratado.

Por su parte, la pendiente de la mesa gravimétrica controla el tiempo de residencia de las partículas sobre la superficie de separación e influye directamente en la estratificación por densidad. Una pendiente elevada favorece la descarga rápida de ganga, pero limita la oportunidad de separación del oro por densidad, mientras que una pendiente muy baja provoca la obstrucción y pérdida de selectividad de la mesa gravimétrica (Kannan et al. 2017; Arief, 2022).

La optimización conjunta de estas variables como tamaño de partícula de oro, caudal de agua y pendiente de la mesa gravimétrica es esencial para maximizar la eficiencia de recuperación de oro. Varios estudios experimentales y modelos cinéticos han demostrado que el ajuste individual de una sola variable no garantiza una mejora significativa si las demás no son reguladas en concordancia (You & Liu, 2023; Yadav et al., 2022). Por tanto, la implementación de prácticas operativas basadas en evidencia técnica y mineralógica puede reducir las pérdidas de oro fino, minimizar la dependencia del mercurio y mejorar la sostenibilidad de la minería aurífera artesanal.

El objetivo esta investigación es determinar el efecto de la mesa gravimétrica en la recuperación de oro aluvial de concentrados de esclusas en la región de Madre de Dios. Existe escasa sistematización científica sobre el uso de mesas gravimétricas en Madre de Dios. Faltan estudios que evalúen variables operativas clave de forma integral, que limita su optimización. Este estudio busca mejorar la eficiencia y sostenibilidad del proceso gravimétrico, proponiendo una alternativa técnica que promueva prácticas mineras más limpias.

Métodos

Área de estudio

La investigación se desarrolló a partir del análisis de muestras de concentrado de esclusas recolectadas en tres unidades mineras ubicadas en la región de Madre de Dios, al sureste del Perú, una de las zonas de mayor actividad minera artesanal y aluvial del país. Las unidades seleccionadas fueron: Raúl

I (latitud 12° 51' 41,75", longitud 70° 34' 39,09"), Rivaldo, situada en el centro poblado de Pukiri, provincia del Manu (latitud 12° 47' 53,96", longitud 70° 34' 73,67"), y Paolita II, localizada en el distrito de Laberinto, provincia de Tambopata (latitud 12° 40' 29,39", longitud 69° 37' 45,12").

La selección de estas concesiones se basó en su representatividad dentro del corredor minero regional, dado que emplean tecnologías de explotación artesanal como esclusas y sistemas de recuperación gravimétrica, además de estar ubicadas en zonas con características geográficas y operativas contrastantes. Estas diferencias permiten realizar un análisis comparativo de las condiciones que afectan la eficiencia en la recuperación de oro, contribuyendo así a una comprensión más integral del comportamiento del proceso gravimétrico en contextos reales de producción.

Periodo de estudio

La investigación comprendió desde agosto 2023 a enero 2024.

Descripción de métodos

La investigación abordó 3 métodos, de campo, de laboratorio y estadístico.

Métodos de campo

Durante la etapa de muestreo, se recolectaron 10 kg de concentrado de esclusa en cada una de las tres concesiones seleccionadas, conformando una muestra compuesta total de 30 kg. El muestreo se realizó en un único evento por cada unidad minera, durante una jornada productiva continua de 8 horas, para garantizar la representatividad del material procesado.

Procedimiento de deslamado del concentrado aurífero aluvial:

El proceso de deslamado se inició con la preparación de una pulpa homogénea a partir de una mezcla de concentrado de canalón (arenilla negra), lodos y agua, con el objetivo de dispersar las partículas finas aglomeradas. Esta pulpa fue alimentada de forma continua y uniforme al

Reflux Classifier, garantizando un flujo estable que facilitará la separación eficiente de partículas según su tamaño y densidad.

La fluidización del lecho inferior del clasificador se mantuvo mediante la inyección continua de agua de fluidización primaria (jw), provista por una bomba centrífuga, a través de distribuidores ubicados en la base del equipo. Este flujo de agua permitió mantener suspendidas las partículas más gruesas y prevenir su sedimentación. La densidad del lecho se reguló utilizando una válvula esférica de PVC de 1", que controlaba la descarga inferior de sólidos, permitiendo mantener una concentración constante y evitar fluctuaciones operativas.

Se implementó la técnica de fluidización dividida (js), añadiendo agua secundaria en zona superior del clasificador mediante válvulas de control independientes (llaves de paso PVC de 1"). Este flujo ascendente adicional generó un efecto de lavado contracorriente, el cual redujo significativamente el arrastre de partículas finas hacia el concentrado y mejoró la eficiencia del proceso incluso bajo condiciones de alta carga sólida.

El concentrado deslamado fue extraído de forma continua desde el fondo del lecho. El caudal se ajustó en función de la tasa de alimentación del concentrado, manteniéndose así una altura de lecho constante. Para facilitar el transporte del concentrado espeso a la siguiente etapa, se añadió agua auxiliar a la línea de descarga, favoreciendo una suspensión densa pero bombeable.

El rebose, compuesto principalmente por lodos (partículas finas < 45 µm) y líquido excedente, fue colectado a través de canales inclinados especialmente diseñados. Estos canales optimizaron la separación, permitiendo la elución selectiva de los lodos mediante flujo vertical ascendente y, al mismo tiempo, reteniendo parte de las partículas finas valiosas que eventualmente son reincorporados al circuito gravimétrico.

Control de calidad (QA/QC) del procedimiento de deslamado

Para garantizar la integridad de las muestras durante el proceso de deslamado y minimizar cualquier posible sesgo o contaminación, se aplicaron

medidas rigurosas de control y aseguramiento de calidad (QA/QC), en conformidad con los estándares aceptados en el procesamiento de minerales y la geoquímica analítica.

Antes del inicio del deslamado, todas las superficies en contacto con las muestras (tolvas, tuberías, válvulas, canales de rebose y la cámara del Reflux Classifier) fueron lavadas y enjuagadas con agua desionizada y posteriormente secadas con aire comprimido para evitar contaminaciones cruzadas entre muestras o corridas previas.

Se monitoreó el rebose y se realizó un muestreo periódico del mismo para detectar posibles pérdidas de oro fino o partículas pesadas. En caso de observarse concentraciones anómalas, se ajustaron los parámetros de fluidización y pendiente de canales.

La tasa de alimentación de pulpa, el caudal de agua de fluidización (jw) y de lavado (js) fueron controlados mediante medidores de flujo y registros continuos. La densidad de pulpa fue verificada con densímetros tipo Marcy, asegurando una operación consistente.

Cada lote de muestra fue identificado mediante códigos únicos y registrado en un cuaderno de campo con datos de ubicación, fecha, operador responsable y condiciones operativas del equipo. Se mantuvo una cadena de custodia desde la toma de muestra hasta el análisis final en laboratorio.

Se realizaron al menos dos corridas replicadas para cada lote de muestra, con el fin de evaluar la reproducibilidad del deslamado y los valores obtenidos en la recuperación de oro en la fracción deslamada.

Métodos de laboratorio

Preparación de muestras

Las muestras de concentrado de esclusa recolectadas en las tres concesiones fueron procesadas en el laboratorio bajo condiciones controladas. Durante un periodo de ocho horas se recolectaron 10 kg por unidad minera, obteniéndose de las tres unidades mineras una muestra compuesta de 30 kg. Se secó en la estufa a 50 °C, se homogenizó manualmente

por manteo y se dividió mediante el divisor Jones, 30 submuestras representativas de 1 kg cada una. Del total de submuestras, 24 submuestras se destinaron a pruebas por mesa gravimétrica, 1 kg se al análisis granulométrico, 1 kg al análisis de oro por malla valorada y 250 g al ensayo del contenido de oro en cabeza.

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se llevó a cabo utilizando tamices estándar de malla Tyler N° 60, 100, 150, 200 y 325. Previamente, la muestra fue lavada con la malla N° 325 para remover las partículas finas adheridas, y posteriormente tamizada en seco utilizando un equipo vibratorio Ro-Tap marca Duratap (Advantech). El material retenido en cada tamiz fue pesado en la balanza analítica PG 5002-S, con características de legibilidad de 0,01 g, repetibilidad de 0,08 g y linealidad de 0,02 g, asegurando así la precisión del pesaje en cada fracción granulométrica.

Análisis químico

Se analizaron las muestras de cabeza, concentrado y relave obtenidas de las pruebas de la mesa gravimétrica, muestras de separación por fracción granulométrica de No 60, 100, 150, 200 y 325. Para cada análisis, se utilizaron entre 2 y 20 gramos de muestra, las cuales fueron mezcladas con un fundente compuesto por 50 % de litargirio, 30 % de carbonato de sodio, 10 % de bórax y 10 % de sílice. La muestra fue encuartada con cloruro de plata en una proporción 1:3, de acuerdo con las características mineralógicas del material.

La muestra fue fundida en un crisol de arcilla refractaria a 1064 °C, empleando plomo como colector para captar las partículas de oro presentes en la mezcla. Durante la fusión, el plomo líquido se dispersa inicialmente en la matriz fundida, interactuando con las partículas de oro y concentrándose en la base del crisol debido a su alta densidad. De manera simultánea, se genera una escoria compuesta por silicatos y boratos que se separa de la fase metálica por diferencia de densidades. La eficiencia del proceso depende de la composición del fundente: el carbonato de sodio actúa como reductor, la sílice como regulador de pH, y el bórax como escorificador. Adicionalmente,

se adicionan harina como reductor en muestras oxidadas y nitrato de potasio como oxidante en materiales sulfurados, lo que optimiza la fusión y mejora la recuperación de oro por el plomo. El material fundido se coló en lingoteras de fondo cónico, obteniéndose un régulo (plomo: oro) de aproximadamente 35 gramos, separado de la escoria. El régulo fue sometido a copelación en horno, utilizando copelas previamente calentadas, cuya función es absorber el 98,5 % del óxido de plomo (PbO), permitiendo la obtención del doré. El doré obtenido fue tratado con ácido nítrico al 20 % para disolver la plata, posteriormente secado a 50 °C y calcinado a 600 °C en estufa. Finalmente, el contenido de oro fue pesado utilizando una ultramicrobalanza RPR2U, con una capacidad máxima de 2,1 g, legibilidad de 0,1 µg y repetibilidad de 0,15 µg, lo que garantiza la alta sensibilidad y precisión necesarias para la cuantificación del oro presente.

Método estadístico

Con el objetivo de determinar la recuperación de oro aluvial mediante concentración gravimétrica, se evaluaron tres variables independientes en el proceso; el tamaño de partícula del oro en un rango entre 250 y 44 micras que incide en la capacidad del oro para asentarse y ser capturado; el caudal de agua ajustado entre 10 y 14 litros por minuto, determina la dispersión y estratificación del material sobre la mesa; y la pendiente de la mesa gravimétrica variada entre 1° y 6°, modifica la velocidad de desplazamiento del flujo, afectando el tiempo de contacto y la eficiencia de retención, variables que tuvieron influencia directa sobre la eficiencia del proceso de separación en la densidad. Por consiguiente, a la variable dependiente; el porcentaje de recuperación de oro. Se utilizó un diseño experimental factorial completo 23, con dos niveles por variable, permitiendo evaluar tanto los efectos individuales como las interacciones dobles y triples entre factores. La experimentación fue realizada bajo condiciones controladas y con 3 réplicas, asegurando la validez estadística de los datos recolectados.

Para el tratamiento de los datos se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 95 % ($p < 0,05$), utilizando el software estadístico R. Esta prueba permitió

identificar la influencia estadística de cada factor sobre la variable de respuesta. Los resultados evidenciaron que el caudal fue el factor más significativo ($p < 0,05$), seguido por el tamaño de partícula ($p < 0,05$), mientras que el tamaño de partícula de oro mostró una interacción significativa con la pendiente, caudal de agua también mostró una interacción significativa con la pendiente indicando que su efecto depende del rango granulométrico utilizado. Estos hallazgos validaron que la recuperación de oro no depende únicamente de factores individuales, sino de la interacción entre factores, que permite establecer condiciones óptimas de funcionamiento para mejorar la eficiencia de la mesa gravimétrica.

Resultados

Análisis de varianza – ANOVA

Los resultados del ANOVA, indican que, para optimizar la recuperación de oro mediante mesa gravimétrica, es fundamental controlar el tamaño de partícula del oro y el caudal de agua, ya que ambos factores presentan un efecto altamente significativo. Asimismo, las interacciones entre tamaño de partícula de oro y pendiente de la mesa gravimétrica, así como entre caudal de agua y pendiente de la mesa gravimétrica, resultan determinantes, indica que estos parámetros deben ajustarse de manera conjunta y no de forma independiente para alcanzar una eficiencia máxima. En contraste, la pendiente de la mesa, evaluada de manera aislada, no mostró un efecto estadísticamente significativo sobre la recuperación (Tabla 1).

Tabla 1
Resultados de análisis de varianza ANOVA recuperación de oro por mesa gravimétrica

Fuente	gl	SumCua	MediaCua	Valor F	p-valor
f_tamaño	1	308,2	308,2	28,015	7,28e-05
f_caud	1	816,7	816,7	74,242	2,09e-07
f_pendiente	1	24,0	24,0	2,182	0,159
f_tamaño*f_caudal	1	24,0	24,0	2,182	0,159
f_tamaño*f_pendiente	1	1014,0	1014,0	92,182	4,82e-08
F_caudal*f_pendiente	1	504,2	504,2	45,833	4,50e-06
F_tamaño*f_caudal*f_pend	1	1,5	1,5	0,136	0,717
Residuals	16	176	1,0		

Tamaño de partícula

El tamaño de partícula es un factor crítico y altamente significativo para la optimización de la recuperación de oro por mesa gravimétrica. Se muestra que el 84,82 % población del oro se encuentra sobre los 105 μm , indica que el proceso

debe diseñarse para manejar eficientemente este tamaño. Además, la interacción significativa de la pendiente de la mesa gravimétrica exige que el ajuste del tamaño de partícula de oro se realice en conjunto con la pendiente de la mesa, a fin de alcanzar la máxima recuperación del oro (Veiga & Gunson, 2020) (Tabla 2).

Tabla 2
Distribución de oro por mallas en el concentrado

Malla	Abertura (μm)	Peso (g)	Porcentaje (%)	Ley Au (g/t)	Contenido metálico Au (g)	Distribución Au (%)
60	50	4,00	0,40	0,000	0,00	0,00
100	50	18,60	1,86	0,568	105,65	2,16
140	05	456,00	45,60	0,910	4149,60	84,82
200	5	19,60	1,96	0,874	171,30	3,50
325	4	497,20	49,72	0,093	462,40	9,45
-325	-44	4,60	0,46	0,076	3,50	0,07

Se presenta el balance de recuperación de oro por mesa gravimétrica, mostrando una recuperación del 86,98 % de oro en el concentrado, con una ratio de cabeza de 16,67. Esto indica que una proporción significativa del oro alimentado al proceso es exitosamente separada y recuperada

en el concentrado, mientras que el 13,02 % del oro se reporta en el relave. La eficiencia de esta recuperación está intrínsecamente ligada a la distribución del tamaño de partícula del oro en el concentrado (Tabla 3).

Tabla 3
Balance de recuperación de oro por mesa gravimétrica

Muestra	Peso de muestra (g)	Peso fino (mg)	Ley Au (g/TM)	Recuperación (%)	Ratio
Cabeza	1000,00	48,920	4892,000	100,00	
Concentrado	60,00	42,551	42 551,000	86,98	16,67
Relave	940,00	6,369	636,90	13,02	

Caudal de agua

Se afirma que el caudal de agua de alimentación a la mesa gravimétrica constituye un factor individual altamente significativo en la recuperación de oro mediante la mesa gravimétrica. El caudal regula la velocidad del flujo sobre la superficie de la mesa, afectando directamente el transporte y la estratificación de las partículas minerales y el oro según su densidad y tamaño. Un caudal insuficiente impidió la separación efectiva, mientras que un caudal exceso arrastra partículas de oro al relave, disminuyendo la recuperación.

Asimismo, el análisis de varianza revela que la interacción entre el caudal de agua y la pendiente de la mesa gravimétrica resulta significativa. Esta combinación define la dinámica del flujo laminar y la capacidad de clasificación por densidad. Una pendiente elevada de mesa gravimétrica combinada con un caudal alto favorece el arrastre de partículas finas y livianas, mientras que una pendiente más baja facilita la concentración de partículas pesadas si el caudal es adecuadamente regulado. Por tanto, la optimización simultánea de ambos factores es esencial para maximizar la recuperación de oro y minimizar las pérdidas por arrastre o sedimentación ineficiente.

Pendiente de la mesa gravimétrica

La pendiente de la mesa gravimétrica constituye un factor crítico no por su efecto individual, sino debido a sus interacciones altamente significativas con el caudal de agua de alimentación y el tamaño de partícula del oro. Estas interacciones son

determinantes en la eficiencia de concentración de oro por la mesa gravimétrica, ya que modifican el comportamiento de las partículas sobre la superficie de la mesa.

Cuando se calibra la mesa gravimétrica la pendiente con el caudal de agua, se logra una distribución del flujo superficial uniforme que permite una mejor estratificación de la ganga, favoreciendo la concentración del oro sin arrastrar partículas valiosas al relave. Este efecto se intensifica en presencia de partículas finas de oro, cuya separación eficiente depende de una hidrodinámica cuidadosamente balanceada entre velocidad de flujo, fuerza gravitacional y resistencia hidráulica. Por tanto, la correcta calibración de la pendiente de la mesa, en interacción con el caudal y el tamaño de partícula, es esencial para maximizar la recuperación de oro, en minerales aluviales de granulometría heterogénea. Esta sinergia operativa permite no solo mejorar la selectividad del proceso, sino también minimizar pérdidas en fracciones de oro fino en el relave.

Discusión

Tamaño de partícula

Yıldırım Gülsøy & Gülcen (2019), realizaron el análisis del comportamiento de tres fracciones de tamaño de -1000 µm, -800 µm y -600 µm de una muestra de cromita de alta ley, que contenía de 32 a 33 %. Estas fracciones fueron sometidas a una prueba de concentración por mesa gravimétrica utilizando parámetros de operación similares, variando el tamaño de partícula y el caudal de agua

de lavado, con el objetivo de evaluar su efecto en la concentración. Los resultados de concentración mostraron que una liberación adecuada a una fracción de $-600 \mu\text{m}$ resultó en una ley superior. Este hallazgo resaltó la importancia controlar el tamaño de las partículas en la recuperación de oro aluvial por la mesa gravimétrica con las partículas que de $250 \mu\text{m}$ hasta $-44 \mu\text{m}$. El análisis de la distribución de tamaño de las partículas de oro aluvial realizada al concentrado reveló que el 90,48 % se encontraba en el rango de $250 \mu\text{m}$ a $75 \mu\text{m}$, lo cual se consideró aceptable para la recuperación con mesa gravimétrica. Según Ernawati et al. (2018), la recuperación de oro con la mesa gravimétrica alcanza el 90 % si el tamaño de los granos de oro es de 3 mm - $70 \mu\text{m}$. Sin embargo, en el concentrado el 9,52 % de las partículas de oro aluvial estaban en el rango de $-74 \mu\text{m}$ a $-44 \mu\text{m}$, que resaltó la necesidad de llevar el control del tamaño de partícula para alcanzar la recuperación y minimizar la pérdida de oro en el relave. Ernawati et al. (2018), señalan que la forma de las partículas de oro influye en la recuperación de oro en la mesa gravimétrica. El oro en forma escamas, al tener mayor superficie, es más ligero y tiende a arrastrarse al relave junto con el oro hidrofóbico. En el estudio realizado, el oro aluvial se presentó en forma redondeada, los granos forma irregular por su maleabilidad. La forma de oro en escamas redujo la densidad de las partículas, haciéndolas livianas, que provocó que los granos finos floten en la mesa gravimétrica y se pierdan en el relave que coincide con resultado obtenido de (Veiga & Gunson, 2020).

Caudal de agua

Yıldırım Gülsoy & Gülcen (2019), evaluaron el efecto del caudal de agua en la recuperación de comita. Los resultados mostraron que, al utilizar un caudal de agua de 1 litro por minuto, se observó una reducción significativa en la recuperación de cromita en tamaños pequeños comparado con el caudal de 0,5 l/min. Sin embargo, un mayor caudal de agua aumentó la recuperación de cromita en la etapa rougher y mejoró la ley del concentrado final. El caudal de 1 litro por minuto incrementó la recuperación de cromita y la calidad del concentrado final en la fracción gruesa ($-100 \mu\text{m}$) comparado con caudal de 0,5 litros por minuto. En el estudio, el agua se suministró a la mesa gravimétrica a través de una tubería de 1 pulgada

de diámetro extendida a lo largo del tablero de la mesa. Esta tubería contaba con agujeros perforados de 1/16 pulgada de diámetro, separadas cada una de 1 a 2 pulgadas de distancia, que permitía la distribución uniforme del agua. El caudal de agua de lavado se ajustaba en función del tamaño de las partículas de oro en la alimentación. El caudal de agua de lavado fue un factor fundamental en la concentración y se controló mediante una válvula esférica de 1 pulgada, que resultó en un caudal de 9 l/min con una recuperación del 90 % de oro. Sin embargo, al aumentar el caudal a 14 litros por minuto, la recuperación de oro disminuyó al 63 %. La alimentación de agua se operó en circuito cerrado con una bomba centrífuga de 0,75 HP con entrada y salida de 1 pulgada.

Pendiente

Los resultados de esta investigación indican que la pendiente de la mesa gravimétrica es de 2 grados, con una concentración de partículas del 90,48 % en el rango de tamaño de $75 \mu\text{m}$ a $250 \mu\text{m}$. Este hallazgo permitió mejorar la eficiencia de recuperación de oro aluvial por mesa gravimétrica. Los resultados obtenidos coinciden con el reporte de estudio revelado por Yıldırım & Gülcen (2019), quienes encontraron que, para muestras de cromita de baja ley, la variación en la eficiencia de recuperación de partículas de cromita de $75 \mu\text{m}$ se optimizaba con una pendiente de 4 grados en la mesa gravimétrica.

Conclusiones

El estudio evaluó el efecto del tamaño de partícula, caudal de agua y pendiente sobre la recuperación de oro aluvial en mesas gravimétricas en Madre de Dios. Se determinó que el tamaño de partícula y el caudal influyen significativamente en la eficiencia, mientras que la pendiente interactúa con ambas variables. Se alcanzó una recuperación del 86,98 %, concentrando la mayor parte del oro entre 105 y $250 \mu\text{m}$. Los resultados validan la mesa gravimétrica como alternativa técnica al mercurio, promoviendo una minería artesanal más eficiente, limpia y sostenible, adaptada a las condiciones locales de Madre de Dios. Así mismo, el estudio ha identificado algunas limitaciones que comprenden diversos aspectos técnicos y operativos propios de la mesa gravimétrica. En

primer lugar, destaca la dificultad inherente a la medición y adquisición de datos en tiempo real, que restringe la capacidad de monitoreo y ajuste dinámico de la mesa gravimétrica. Además, persiste la problemática asociada a la baja eficiencia en la recuperación de partículas finas de oro, tal como se evidencia en los resultados presentados en la Tabla 2, aunque las causas relacionadas con la hidrofobicidad no fueron específicamente abordadas en las referencias consultadas para la mesa gravimétrica, su efecto sobre el rendimiento de la recuperación no puede descartarse. Además, se identifican limitaciones en la escalabilidad de la recuperación, especialmente al trasladar los parámetros óptimos obtenidos en laboratorio a condiciones operativas a mayor escala. Finalmente, la falta de automatización completa y la ausencia de una estrategia de optimización integral de los parámetros operativos continúan siendo retos cruciales para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y reproducibilidad de la concentración de la mesa gravimétrica en entornos de minería aluvial.

Conflictivo de interés

El autor no encontró en una situación de conflicto de interés real.

Referencias

- Abbireddy, C. O. R., & Clayton, C. R. I. (2009). A review of modern particle sizing methods. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Geotechnical Engineering* (Vol. 162, Issue 4, pp. 193–201). <https://doi.org/10.1680/geng.2009.162.4.193>
- Andò, S. (2020). Gravimetric separation of heavy minerals in sediments and rocks. *Minerals*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/min10030273>
- Arief, T. (2022). Design and Experimentation Shaking Table Tool for GravityConcentration Metal Mineral Separation. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 7(1), 1. <https://doi.org/10.11648/jijmpem.20220701.11>
- Ateh, K. I., Suh, C. E., Shuster, J., Shemang, E. M., Vishiti, A., Reith, F., & Southam, G. (2021). Alluvial gold in the Bétaré Oya drainage system, east Cameroon. *Journal of Sedimentary Environments*, 6(2), 201–212. <https://doi.org/10.1007/s43217-021-00051-w>
- Burt, R. (1999). The role of gravity concentration in modern processing plants*. In *Minerals Engineering* (Vol. 12, Issue 11).
- Das, A., & Sarkar, B. (2018). Advanced Gravity Concentration of Fine Particles: A Review. In *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* (Vol. 39, Issue 6, pp. 359–394). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/08827508.2018.1433176>
- Dominy, S., Xie, Y., Dominy, S. C., Xie, Y., & Platten, I. M. (2008). Characterisation of *in situ* gold particle size and distribution for sampling protocol optimisation. <https://www.researchgate.net/publication/289363579>
- Ernawati, R., Idrus, A., & Petrus, H. T. B. M. (2018). Study of the optimization of gold ore concentration using gravity separator (shaking table): Case study for LS epithermal gold deposit in Artisanal Small scale Gold Mining (ASGM) Paningkaban, Banyumas, Central Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(1). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/212/1/012019/pdf>
- Falconer, A. (2003). Gravity separation: Old technique/new methods. *Physical Separation in Science and Engineering*, 12(1), 31–48. <https://doi.org/10.1080/1478647031000104293>
- Ferdana, A. D., Petrus, H. T. B. M., Bendiyasa, I. M., Prijambada, I. D., Hamada, F., & Sachiko, T. (2018). Optimization of gold ore Sumbawa separation using gravity method: Shaking table. *AIP Conference Proceedings*, 1945. <https://doi.org/10.1063/1.5030292>
- Flora Elsa Huaman-Paredes, Gregorio Urbano Palma-Figueroa, Lisveth Flores-del Pino (2020). Caracterización preliminar de residuos de minería aluvial en la región de Madre de Dios. *Revista cubana de Química*, 32, 1–13.

- Jiga, A. P., Pasithbhattarabhorn, J., Juntarasakul, O., Pimolrat, J., Soonthornwiphat, N., & Phengsaart, T. (2022). Gold recovery from the residue of jewelry waste recycling: Pre-treatment using shaking table separation and flotation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1071(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1071/1/012024>
- José, F. D. S., Barcelos, H. O., & Pereira, C. A. (2018). Combination of gravity concentration variables to increase the productivity of the Brucutu mineral processing plant. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(2), 158–164. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2017.06.002>
- Kannan, A. S., Jareteg, K., Lassen, N. C. K., Carstensen, J. M., Hansen, M. A. E., Dam, F., & Sasic, S. (2017). Design and performance optimization of gravity tables using a combined CFD-DEM framework. *Powder Technology*, 318, 423–440. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.05.046>
- Li, L., Remmelgas, J., van Wachem, B. G. M., von Corswant, C., Johansson, M., Folestad, S., & Rasmuson, A. (2015). Residence time distributions of different size particles in the spray zone of a Wurster fluid bed studied using DEM-CFD. *Powder Technology*, 280, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.04.031>
- Manser, R. J., Barleyt, R. W., & Willst, B. A. (1991). The shaking table concentrator-the influence of operating conditions and table parameters on mineral separation-the development of a mathematical model for normal operating conditions. In *Minerals Engineering* (Vol. 4, Issue 4).
- Marion, C., Williams, H., Langlois, R., Kökkiliç, O., Coelho, F., Awais, M., Rowson, N. A., & Waters, K. E. (2017). The potential for dense medium separation of mineral fines using a laboratory Falcon Concentrator. *Minerals Engineering*, 105, 7–9. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.12.008>
- Martinez, G., Restrepo-Baena, O. J., & Veiga, M. M. (2021). The myth of gravity concentration to eliminate mercury use in artisanal gold mining. In *Extractive Industries and Society* (Vol. 8, Issue 1, pp. 477–485). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.01.002>
- Mkandawire, N. P., McGrath, T., Bax, A., & Eksteen, J. (2020). Potential of the dense media cyclone for gold ore preconcentration. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 129(1), 87–95. <https://doi.org/10.1080/25726641.2019.1669982>
- Nasiha, H. J., & Shanmugam, P. (2018). Estimation of settling velocity of sediment particles in estuarine and coastal waters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 203, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.02.001>
- Prasetya, A., Ahsa, W. M., Gustiana, H. S. E. A., Astuti, W., & Petrus, H. T. B. M. (2020). Effect of Particle Size and Shaking Speed on Enhancing Concentration of Manganese using Shaking Table. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 742(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/742/1/012027>
- Santana, V., García Blanco, Y. J., Germer, E. M., & Franco, A. (2021, December 15). Analysis of particles sedimentation in shear-thinning fluid: settling velocity, drag coefficient, and settling trajectories comparison. <https://doi.org/10.26678/abcm.cobem2021.cob2021-0957>
- Silva, M., Van Vleck, G. K., Deukmejian, G., & Blubaugh, D. L. (n.d.). *Special Publication 87 1986 California department of conservation division of mines and geology placer gold recovery methods placer gold recovery methods*.
- Teniola, O. S., Adeleke, A. A., Ibitoye, S. A., & Shitu, M. D. (2022). Effectiveness of Gravity Separation of Low Grade Nigerian Gold Ore Using Shaking Table. *International Journal of Nonferrous Metallurgy*, 10(02), 15–22. <https://doi.org/10.4236/ijnm.2022.102002>
- Teschner, B., Smith, N. M., Borrillo-Hutter, T., John, Z. Q., & Wong, T. E. (2017). How efficient are they really? A simple testing method of

- small-scale gold miners' gravity separation systems. *Minerals Engineering*, 105, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.01.005>
- Ulusoy, U., & Atagun, O. N. (2023). Particle shape characterization of shaking table streams in a Turkish chromite concentration plant by using dynamic imaging and microscopical techniques. *Particulate Science and Technology*, 41(2), 141–150. <https://doi.org/10.1080/02726351.2022.2046666>
- Veiga, M. M., & Gunson, A. J. (2020). Gravity concentration in artisanal gold mining. In *Minerals* (Vol. 10, Issue 11, pp. 1–50). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/min10111026>
- Vieira, R. (2006). Mercury-free gold mining technologies: Possibilities for adoption in the Guianas. *Journal of Cleaner Production*, 14(3–4), 448–454. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.007>
- Waterman Sulistyana Bargawa, & Eko Hardiyanto. (2017). Characterization of the Gold Ore to Acquire an Optimum Degree of Liberation. *Journal of Environmental Science and Engineering B*, 6(6). <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2017.06.006>
- Yadav, S., Sieffert, Y., Vieux-Champagne, F., Debove, L., Decret, D., Malecot, Y., & Garnier, P. (2022). Optimization of the Use Time of a Shake Table with Specimen Preparation outside the Table Surface. *Buildings*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/buildings12030319>
- Yıldırım Gülsøy, Ö., & Gülcen, E. (2019). A new method for gravity separation: Vibrating table gravity concentrator. *Separation and Purification Technology*, 211, 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.074>
- You, K., & Liu, H. (2023). Research on optimization of control parameters of gravity shaking table. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28171-5>



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY) International License <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>