



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Evaluación del uso de un concentrador gravimétrico para la  
recuperación de oro en arenas residuales de baja ley”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS**

**Autores:**

CHIMBO VÁSQUEZ ODALIS MICHELLE

ORELLANA MERCHÁN ALEXANDER JAIR

**Director:**

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

Michelle Odalis Chimbo Vásquez

Alexander Jair Orellana Merchán

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Mayo 2026

**“Evaluación del uso de un concentrador gravimétrico para la recuperación de oro en arenas residuales de baja ley”**

## **DEDICATORIA**

Dedico este logro a la memoria de mi abuelito, por haber sido una figura paterna para mí y por dejarme enseñanzas que me acompañan hasta el día de hoy.

A mi mamá, Tatiana, porque su esfuerzo constante desde la distancia me abrió el camino para alcanzar mi formación profesional.

A mi abuelita Gladys, por su paciencia, sus valores y por haberme guiado con tanto amor desde mi infancia.

Y de manera especial a mis tíos y tías, a quienes considero mis hermanos de vida, por brindarme su compañía en cada etapa de este trayecto académico.

**Odalis Chimbo V.**

Este trabajo está dedicado principalmente a mi familia, que ha sido mi mayor apoyo a lo largo de mi vida y carrera. A mis padres, Jacinto y Gloria, por su inspiración, sacrificio y aliento, y a mis hermanos, Andrea, Allan, Anny, por sus palabras de ánimo y sonrisas en los momentos difíciles.

A Rachel, mi compañera de vida, por su paciencia, cariño y por ser mi refugio en cada desafío.

También reconozco el invaluable aporte de mis docentes, cuya dedicación y orientación han enriquecido mi aprendizaje y moldeado mi pensamiento.

No puedo dejar de mencionar a todos mis compañeros de clase, con quienes hemos completado todos estos desafíos que nos han mejorado día a día.

A todos ustedes, les estoy profundamente agradecido por su apoyo y amor. Este logro no habría sido posible sin ustedes. ¡Gracias!

**Jair Orellana M.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mi gratitud a mi mamá, Tatiana, por su esfuerzo diario y su apoyo constante desde la distancia, lo cual me dio la motivación necesaria para culminar mi carrera.

A mi abuelita Gladys, por haberme criado con tanto cariño y paciencia, cuidado de mí en cada paso de mi vida y de mis estudios. Asimismo, agradezco a mis tíos, tías y a toda mi familia por confiar en mí a lo largo de este camino universitario.

De manera especial, agradezco a nuestro tutor, el ingeniero Fernando Valencia, por transmitirnos sus conocimientos, enseñarnos cosas nuevas y guiarnos con paciencia en el desarrollo de este proyecto.

Al ingeniero Eduardo Luna, por su valioso tiempo, por estar siempre pendiente de cómo íbamos avanzando y por cada una de sus sugerencias para mejorar esta tesis.

Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a todos los ingenieros de la carrera que formaron parte de nuestra educación en las aulas.

**Odalís Chimbo V.**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres, Jacinto y Gloria, porque son y serán la fuente infinita de inspiración y todo el apoyo que recibo de ellos ha sido mi pilar fundamental junto con mis entrañables hermanos. Su apoyo incondicional, comprensión y aliento constante han sido la luz que ha iluminado cada paso de este viaje académico.

A mi novia, mi compañera de vida, Rachel, por su apoyo incondicional que me ha brindado.

Mi más profundo agradecimiento a mi tutor de tesis, el ingeniero Fernando Valencia. Su sabiduría, orientación y compromiso han sido esenciales para este trabajo, enriqueciendo tanto mi investigación como mi crecimiento personal y profesional.

Asimismo, agradecer al ingeniero Eduardo Luna por su apoyo, guía y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. Sus conocimientos y orientación fueron de gran ayuda en cada etapa del proceso, contribuyendo significativamente a la realización de este trabajo.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento por ser parte de este viaje y por su inestimable contribución a este logro académico. Sin su apoyo y dedicación, este camino habría sido mucho más difícil de recorrer.

**Jair Orellana M.**

## RESUMEN

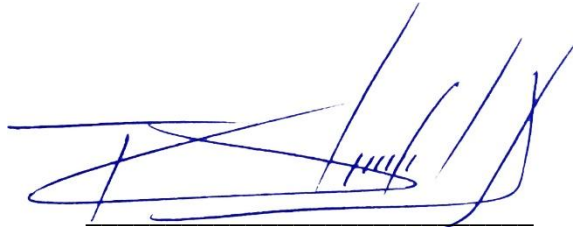
El presente estudio describe el comportamiento de arenas mineralizadas con bajo tenor al someterlas a procesos de concentración gravimétrica y flotación. Se clasificaron las arenas de bajo tenor en una mesa gravimétrica, variando el ángulo de inclinación y obteniendo distintas concentraciones. Como resultado del proceso de concentración en la mesa gravimétrica, operada con inclinaciones de 2 grados (2°), 3° y 4°, se recuperaron concentrados minerales que fueron sometidos a análisis químico, registrándose valores de 1,05 g/t Au para la inclinación de 2°, 1,02 g/t Au para 3° y 1,56 g/t Au para 4°.

Los resultados evidencian que la inclinación influyó en el grado de concentración del oro presente en las arenas mineralizadas. Los concentrados generados en la etapa de concentración gravimétrica, correspondientes a la muestra madre y a las inclinaciones de 2°, 3° y 4° de la mesa gravimétrica, fueron sometidos consecutivamente al proceso de flotación. A partir de este procedimiento se obtuvieron concentrados con leyes de 6,07 g/t Au, 3,49 g/t Au, 5,69 g/t Au y 10,31 g/t Au, respectivamente.

Los ensayos de concentración gravimétrica evidenciaron que el concentrado producido con la mesa gravimétrica operada a una inclinación de 4° presentó una menor recuperación de material en comparación con las inclinaciones de 2° y 3°. No obstante, este concentrado registró una mayor ley de oro (tenor), reflejando una mayor concentración del mineral valioso en menor cantidad de material.

Finalmente, dichos resultados sugieren que la inclinación de 4° favoreció la obtención de un concentrado de mejor calidad para posteriores procesos metalúrgicos.

**Palabras clave:** minería, tenor, flotación, enriquecimiento, mesa gravimétrica.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and strokes, positioned above a horizontal line.

~~Ing. Fernando Tulio Valencia.~~

**Director de tesis.**

## ABSTRACT

This study describes the behavior of low-grade mineralized sands subjected to gravity concentration and flotation processes. The low-grade sands were sorted on a gravity table, varying the angle of inclination to obtain different concentrations. As a result of the concentration process on the gravity table, operated at inclinations of 2°, 3°, and 4°, mineral concentrates were recovered and subjected to chemical analysis, yielding values of 1.05 g/t Au for the 2° inclination, 1.02 g/t Au for 3°, and 1.56 g/t Au for 4°.

The results show that the inclination influenced the degree of gold concentration present in the mineralized sands. The concentrates generated in the gravity concentration stage, corresponding to the stock sample and the 2°, 3°, and 4° inclinations of the gravity table, were then subjected to the flotation process. This procedure yielded concentrates with grades of 6.07 g/t Au, 3.49 g/t Au, 5.69 g/t Au, and 10.31 g/t Au, respectively.

Gravity concentration tests showed that the concentrate produced with the gravity table operated at a 4° inclination had a lower material recovery compared to inclinations of 2° and 3°. However, this concentrate had a higher gold grade, reflecting a greater concentration of the valuable mineral in a smaller quantity of material.

Finally, these results suggest that the 4° inclination favored obtaining a higher-quality concentrate for subsequent metallurgical processes.

**Keywords:** mining, tenor, flotation, enrichment, gravity table.



Ing. Fernando Tulio Valencia.

**Thesis Director.**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>iii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>v</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>3</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
<i>1.1 Antecedentes.....</i>	<i>3</i>
<i>1.2 Geología local.....</i>	<i>4</i>
1.3 Marco Teórico.....	5
<i>1.3.1 Arenas residuales .....</i>	<i>5</i>
<i>1.3.2 Características fisicoquímicas y mineralógicas .....</i>	<i>6</i>
1.4 Estados de oro remanente .....	7
1.5 Fundamentos de la concentración gravimétrica.....	8
<i>1.5.1 Ley de Stokes .....</i>	<i>8</i>
<i>1.5.2 Criterio de concentración (CC).....</i>	<i>9</i>
1.6 Equipos de concentración gravimétrica .....	9
<i>1.6.1 Mesas gravimétricas .....</i>	<i>10</i>
<i>1.6.2 Concentradores gravimétricos centrífugos (CGC).....</i>	<i>13</i>
1.7 Muestreo, leyes y balance de masa .....	13
<i>1.7.1 Fundamentos del muestreo representativo.....</i>	<i>14</i>
<i>1.7.2 Principio de conservación y balance de masa.....</i>	<i>14</i>
<i>1.7.3 Parámetros clave de rendimiento metalúrgico.....</i>	<i>15</i>
1.8 Flotación .....	16

<i>1.8.1 Proceso</i> .....	17
<i>1.8.2 Maquinaria</i> .....	18
<i>1.8.2 Reactivos</i> .....	19
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>20</b>
<b>METODOLOGÍA Y ENSAYO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>20</b>
2.1 Formulación de la metodología .....	20
2.2 Localización y descripción del material a utilizar .....	20
2.3 Caracterización y preparación de la muestra .....	22
<i>2.3.1 Muestreo y preparación de muestras</i> .....	22
<i>2.3.2 Análisis químico de la muestra</i> .....	24
<i>2.3.3 Análisis granulométrico</i> .....	25
<i>2.3.4 Determinación de la densidad aparente</i> .....	29
2.4 Etapa experimental: concentración gravimétrica.....	33
<i>2.4.1 Ensayos de concentración gravimétrica</i> .....	33
<i>2.4.2 Análisis químico de los concentrados obtenidos</i> .....	37
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>44</b>
<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	<b>44</b>
3.1 Sistematización y revisión de resultados .....	44
3.2 Resultados de análisis de concentración gravimétrica.....	44
<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>47</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>49</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>50</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>53</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa geológico regional del sector Camilo Ponce Enríquez .....	5
Figura 2. Mesa vibratoria del laboratorio de la Universidad del Azuay.....	11
Figura 3. Proceso de flotación de minerales.....	17
Figura 4. Proceso de flotación de minerales.....	18
Figura 5. Piscinas de arenas residuales de la planta de procesamiento Promine.....	22
Figura 6. Proceso de cuarteo mediante el método de torta.....	24
Figura 7. Resultado del análisis químico de las arenas residuales .....	25
Figura 8. Equipo de tamices utilizados.....	26
Figura 9. Ajuste de la distribución granulométrica mediante el modelo de Rosin- Rammler.....	28
Figura 10. Balanza analítica .....	30
Figura 11. Probetas graduadas.....	32
Figura 12. Mesa gravimétrica tipo Deister .....	35
Figura 13. Muestras de concentrado después del proceso de secado (a, b, c y d).....	41

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Polígono sociedad minera La Antena.....	3
Tabla 2. Densidades de los minerales clave presentes en las arenas residuales auríferas.....	7
Tabla 3. Interpretación del Criterio de concentración (CC) .....	9
Tabla 4. Parámetros clave para la evaluación del desempeño metalúrgico.....	16
Tabla 5. Resultados del análisis granulométrico del material .....	26
Tabla 6. Resultado del análisis químico de los concentrados obtenidos .....	42
Tabla 7. Resultados en la mesa gravimétrica. ....	45
Tabla 8. Resultados de la flotación.....	45

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Transporte de arenas residuales .....	53
Anexo 2. Secado natural de las arenas residuales .....	53
Anexo 3. Secado, acondicionamiento y pesaje de arenas residuales para análisis granulométrico .....	54
Anexo 4. Tamizado granulométrico del material residual .....	54
Anexo 5. Colocación de la muestra en el picnómetro .....	55
Anexo 6. Preparación y envío de muestras al laboratorio .....	55
Anexo 7. Concentración gravimétrica y secado del material .....	56
Anexo 8. Preparación del concentrado para análisis de laboratorio .....	56
Anexo 9. Proceso de flotación .....	57

## INTRODUCCIÓN

La actividad minera aurífera genera grandes volúmenes de residuos como resultado de los procesos de conminución y beneficio del mineral. Estos residuos, conocidos comúnmente como arenas residuales o relaves, aún pueden contener cantidades apreciables de metales valiosos que no fueron recuperados durante las etapas iniciales de procesamiento. En muchos casos, la presencia de oro fino o parcialmente liberado dificulta su recuperación mediante los métodos convencionales, lo que provoca pérdidas metalúrgicas que, bajo ciertas condiciones técnicas y económicas, pueden representar un recurso potencial aprovechable.

En el Ecuador, particularmente en el cantón Ponce Enríquez, la minería aurífera constituye una de las principales actividades económicas de la zona. La explotación y procesamiento de minerales auríferos en esta región han dado lugar a la generación de grandes volúmenes de arenas residuales provenientes de distintas plantas de beneficio. A pesar de haber sido sometidos a procesos de tratamiento, estos materiales pueden conservar fracciones de oro que no fueron recuperadas, principalmente debido al tamaño fino de las partículas o a las características mineralógicas del material.

En este contexto, la aplicación de métodos de concentración gravimétrica representa una alternativa técnica para la recuperación de oro remanente presente en las arenas residuales. Este tipo de procesos se basa en la diferencia de densidad entre el oro y los minerales de ganga, lo que permite su separación mediante el uso de fuerzas gravitacionales y flujo hidráulico. Estos equipos permiten concentrar minerales pesados mediante la combinación de vibración, inclinación y flujo de agua, favoreciendo la separación selectiva de partículas en función de su densidad y tamaño.

La presente investigación se desarrolló a partir de muestras de arenas residuales provenientes de la planta de procesamiento Promine, asociada a la concesión minera San Sebastián en el sector de la mina La Antena, ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez. Con

el fin de evaluar el potencial de recuperación de oro en este material, se realizaron diferentes etapas de caracterización y análisis, entre las que se incluyen el muestreo y preparación de muestras, para determinar la ley de oro presente en las arenas residuales y análisis granulométrico mediante ensayos de tamizado.

A partir de los resultados del análisis granulométrico se determinó la distribución de tamaños de partícula del material, lo que permitió aplicar el modelo de Rosin-Rammler para calcular parámetros característicos como el D50 y el D80. Estos parámetros permiten describir el comportamiento granulométrico del material y constituyen una base importante para comprender su respuesta durante los procesos de concentración. Posteriormente, se realizaron pruebas de concentración gravimétrica utilizando la mesa gravimétrica con el objetivo de evaluar el comportamiento del material sometido a diferentes inclinaciones de concentración gravimétrica y obtener una fracción de menor masa con mayor ley de oro (tenor).

A partir de estas concentraciones, las muestras serán sometidas a proceso de flotación, con el objetivo de obtener un concentrado mineral de mayor ley, el cual sería nuestro producto final.

El desarrollo de este estudio busca aportar información técnica sobre la viabilidad del uso de métodos gravimétricos para el aprovechamiento de arenas residuales de baja ley, contribuyendo de esta manera a mejorar la eficiencia en la recuperación de metales valiosos y al mismo tiempo promover un mejor aprovechamiento de los recursos minerales generados por actividad minera.

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Antecedentes

Las muestras analizadas en la presente investigación fueron obtenidas de la planta de procesamiento de la empresa Promine Cía. Ltda., las cuales corresponden a arenas residuales generadas después de procesos de conminución y beneficio mineral provenientes de la explotación de material mineralizado con contenido de oro y plata.

*Tabla 1. Polígono sociedad minera La Antena*

WGS 84	X	Y
PP	641752.00	9663010.00
P1	641753.00	9662925.00
P2	641661.00	9662921.00
P3	641660.00	9663004.00

*Fuente:* Elaboración propia

Esta operación se encuentra ubicada dentro de la concesión minera San Sebastián, localizada en el Cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Oro, en el sur del Ecuador.

En esta zona minera es común que luego de los procesos de molienda y lixiviación, permanezcan cantidades remanentes de oro en las arenas residuales o relaves. Esto ocurre principalmente debido a la presencia de partículas finas de oro o a la asociación del mineral con metales pesados, los cuales no son completamente recuperados durante los procesos convencionales de beneficio.

Debido a esta situación, surge la necesidad de evaluar métodos alternativos que permitan recuperar el oro remanente presente en estos residuos. Entre estos métodos destaca la

concentración gravimétrica, la cual se basa en la diferencia de densidad entre los minerales para lograr su separación.

La aplicación de técnicas gravimétricas representa una alternativa variable para mejorar la recuperación metálica, especialmente en operaciones de minería artesanal y pequeña minería, donde la optimización del aprovechamiento del recurso mineral resulta fundamental para la rentabilidad y sostenibilidad de las actividades mineras.

## **1.2 Geología local**

La zona de estudio se ubica en el flanco occidental de la Cordillera Occidental de los Andes ecuatorianos, caracterizada por un relieve montañoso y una intensa actividad tectónica que ha generado un sistema estructural complejo con fallas y fracturas que controlan la mineralización.

El sustrato geológico de la región está compuesto principalmente por secuencias volcánicas e intrusivas que han sido afectadas por procesos hidrotermales asociados a la formación de depósitos auríferos. Estas unidades litológicas presentan zonas de alteración hidrotermal y estructuras filonianas donde se concentran minerales metálicos como oro y plata (Paz-Barzola et al., 2022).

En el sector de la concesión San Sebastián, donde se localiza la mina La Antena, las estructuras geológicas actúan como conductos para la circulación de fluidos hidrotermales mineralizados. Estos fluidos depositaron minerales auríferos asociados principalmente a sulfuros como piritita y arsenopiritita, los cuales se encuentran distribuidos de manera heterogénea dentro del macizo rocoso (Paz-Barzola et al., 2022).

Debido a esta variabilidad geológica, no todas las formaciones presentan contenidos económicamente explotables de oro, lo que genera la presencia de materiales de baja ley y arenas residuales que aún pueden contener fracciones recuperables de este metal precioso.



extraído de la mena (Soto, 2012). Estos materiales son depositados en presas o depósitos de relave y representan grandes volúmenes de material con leyes muy bajas que no eran rentables bajo las condiciones económicas y tecnológicas iniciales de la operación (Rodríguez, 2024).

La evaluación de estos depósitos es un imperativo moderno, justificado por la economía circular y la sostenibilidad. Como señalan Whitworth et al. (2022), el estudio de las tecnologías de procesamiento de minerales para la recuperación de metales críticos de desechos mineros se alinea con la tendencia de valorización de residuos, transformando un pasivo ambiental en un activo potencial.

### **1.3.2 Características fisicoquímicas y mineralógicas**

La efectividad del procesamiento de arenas residuales mediante concentración gravimétrica depende de una caracterización mineralógica y granulométrica precisa.

#### **1.3.2.1 Caracterización**

La caracterización fisicoquímica y mineralógica es una etapa fundamental en el procesamiento de arenas residuales, ya que permite conocer las propiedades del material y determinar su comportamiento durante la concentración gravimétrica. Entre las principales pruebas realizadas se encuentra la distribución granulométrica, utilizada para determinar el tamaño de partícula y el grado de liberación del oro mediante tamizado (Acosta & Feijoo, 2020).

También se realiza la determinación de densidad o gravedad específica, parámetro importante para diferenciar minerales pesados del material de ganga, favoreciendo la recuperación del oro por métodos gravimétricos (Villacrés, 1991).

La caracterización mineralógica comprende análisis mediante microscopía, difracción de rayos X o fluorescencia de rayos X, con el fin de identificar los minerales presentes y la

asociación del oro con sulfuros o cuarzo (Rodríguez, 1996). Además, se efectúa la determinación de leyes a través del ensayo al fuego y de la absorción atómica para cuantificar el contenido de oro presente en las muestras (Soria-Aguilar & Carillo-Pedroza, 2021).

Finalmente, el análisis textural permite observar la forma, tamaño y grado de liberación de las partículas auríferas, información necesaria para evaluar la eficiencia del proceso de concentración gravimétrica.

### 1.3.2.2 Distribución granulométrica

Una característica distintiva de los relaves es su finura. El oro que queda en estos residuos es típicamente el que, “debido a su tamaño extremadamente fino (a menudo en el rango de 10 a 75  $\mu\text{m}$ ), fue arrastrado por la corriente de pulpa durante la concentración inicial” (Wills & Finch, 2015, p. 287). Este tamaño de partícula reducido dificulta la recuperación por métodos gravimétricos convencionales, donde las fuerzas de arrastre hidrodinámico dominan sobre la gravedad estándar.

*Tabla 2. Densidades de los minerales clave presentes en las arenas residuales auríferas*

<b>Mineral</b>	<b>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Oro (Au)	19.3
Pirita (FeS <sub>2</sub> )	4.9 - 5.2
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	2.65
Magnetita (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> )	4.9 - 5.2

*Fuente:* (Adaptado de Wills & Finch, 2015; Bustamante et al., 2008)

## 1.4 Estados de oro remanente

El éxito de la concentración gravimétrica se fundamenta en la cantidad de oro libre presente. El oro en las arenas residuales se presenta en dos estados principales (Marsden &

House, 2006):

**Oro libre:** partículas de oro elemental que han sido liberadas de la matriz de la roca. A pesar de ser pequeñas, su alta densidad las hace objetivo del concentrador gravimétrico.

**Oro asociado:** es el oro “encapsulado dentro de los sulfuros de hierro o de otros minerales de ganga, lo que evita el contacto directo del reactivo o del proceso físico” (Espinoza et al., 2021, párr. 3). La concentración gravimétrica sólo podrá recuperar la fracción asociada si la molienda final en el proceso original fue lo suficientemente fina para exponerlo.

## 1.5 Fundamentos de la concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es una técnica de separación que se basa en la gran diferencia de densidad entre el oro y la ganga (Bustamante, Gaviria & Restrepo, 2008). Explican que el proceso aprovecha las diferentes velocidades con que las partículas de distintas densidades y tamaños se asientan en un medio fluido.

### 1.5.1 Ley de Stokes

Para entender cómo se comportan las partículas finas en el fluido, se emplea la Ley de Stokes, que calcula la velocidad terminal de sedimentación ( $V_s$ ) de una partícula esférica en un flujo laminar (Roldán Vargas, 2021):

$$V_s = \frac{g \cdot D_p^2 (\rho_p - \rho_f)}{18 \cdot \mu}$$

Donde los parámetros claves son el diámetro de la partícula ( $D_p$ ) elevado al cuadrado y el contraste de densidades ( $\rho_p - \rho_f$ ).

- $\rho_p$  = densidad de la partícula mineral
- $\rho_f$  = densidad del fluido

- $(\rho_p - \rho_f)$  = diferencia de densidades entre el mineral y el fluido, lo cual influye en la separación gravimétrica de los minerales pesados.

### 1.5.2 Criterio de concentración (CC)

El criterio de concentración es el indicador teórico que predice la viabilidad de la separación gravimétrica. Este criterio se define como la relación entre la diferencia de densidades del mineral denso ( $\rho_d$ ) y del fluido ( $\rho_f$ ), y la diferencia de densidades del mineral liviano ( $\rho_l$ ) y del fluido ( $\rho_f$ ).

$$CC = \frac{\rho_d - \rho_f}{\rho_l - \rho_f}$$

Según (Wills & Finch, 2025), un  $CC$  mayor a 2.5 indica que la separación es excepcionalmente eficiente, incluso para partículas finas. Para el par oro/cuarzo, el  $CC$  es 11.09, lo que corrobora la elección del método para tratar arenas residuales de baja ley.

Tabla 3. Interpretación del Criterio de concentración (CC)

Rango de CC	Dificultad de separación	Viabilidad para partículas finas
$CC > 2.5$	Muy eficiente	Alta
$1.75 < CC < 2.5$	Adecuada	Media
$1.25 < CC < 1.75$	Difícil	Baja
$CC < 1.25$	Imposible	Nula

*Fuente:* (Adaptado de Wills & Finch, 2015)

### 1.6 Equipos de concentración gravimétrica

Los procesos de concentración gravimétrica hacen uso de diversos equipos destinados a separar minerales en función de sus diferencias en densidad, tamaño de las partículas y comportamiento en un medio fluido.

Estos equipos hacen posible la extracción de minerales pesados, como el oro, a partir de arenas residuales o materiales con baja ley.

Las mesas gravimétricas, los concentradores centrífugos, los JIGS y los concentradores en espiral (Wills & Finch, 2015) son algunos de los equipos más empleados.

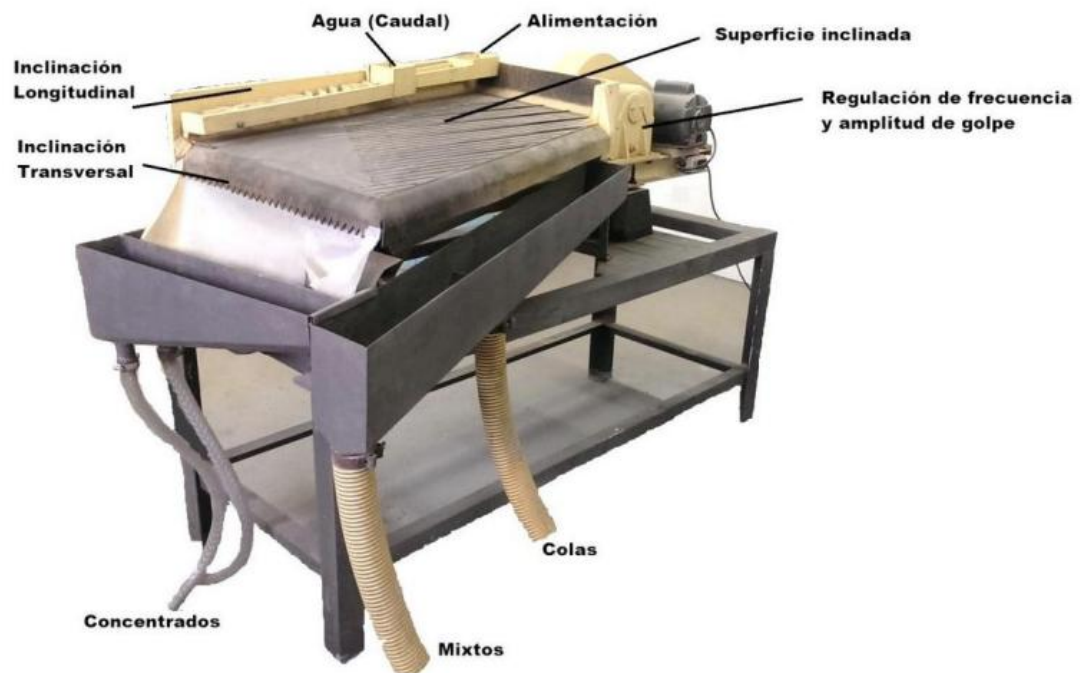
### **1.6.1 Mesas gravimétricas**

Las mesas gravimétricas o mesas vibratorias son equipos utilizados en los procesos de concentración gravimétrica para separar minerales valiosos de la ganga mediante la diferencia de densidades entre las partículas.

Su funcionamiento se basa en el movimiento vibratorio longitudinal de una superficie ligeramente inclinada, sobre la cual se alimenta el material en forma de pulpa y se aplica una corriente de agua que favorece la estratificación del material. Como resultado de la combinación entre la vibración de la mesa, la inclinación del tablero y el flujo de agua, las partículas de mayor densidad tienden a desplazarse hacia las zonas de concentración, mientras que las partículas más livianas son arrastradas hacia la descarga de relaves (Vilcapoma & Chávez, 2012, p. 11).

En la presente investigación se utilizó una mesa gravimétrica tipo Deister, con el objetivo de evaluar la eficiencia del proceso de concentración gravimétrica para la recuperación de oro presente en arenas residuales de baja ley.

Figura 2. Mesa vibratoria del laboratorio de la Universidad del Azuay



*Fuente:* Rivera (2017)

### 1.6.1.1 Partes de la mesa vibratoria

La mesa vibratoria está compuesta por diferentes elementos que permiten su funcionamiento eficiente. Entre sus principales partes se encuentran la superficie o tablero de separación, los rifles o canaletas, el sistema de alimentación, las zonas de descarga (concentrado, intermedio o relave), el mecanismo de vibración, la estructura de soporte y el sistema de distribución de agua (Gupta & Yan, 2006).

### 1.6.1.2 Parámetros de operación de la mesa vibratoria

El desempeño de la mesa vibratoria en los procesos de concentración gravimétrica depende en gran medida del control adecuado de sus variables operativas. Entre los parámetros más relevantes se encuentra el ángulo transversal de inclinación, el cual influye directamente

en la trayectoria de las partículas sobre la superficie del equino, afectando la eficiencia de separación del mineral valioso (Rivera, 2017).

En materiales de baja ley, como las arenas residuales provenientes de procesos previos de beneficio, pequeñas variaciones en este parámetro pueden generar cambios significativos en la recuperación. Se han reportado condiciones óptimas cercanas a 1° de inclinación, con recuperaciones superiores al 80%, lo que demuestra la importancia del ajuste fino de las variables operativas en este tipo de materiales (Rivera, 2017).

Asimismo, variables como la densidad de la pulpa, el caudal del agua de lavado y la regulación de los puntos de descarga influyen en la eficiencia del proceso, permitiendo una mejor diferenciación entre concentrado, intermedios y relaves, especialmente en materiales previamente tratados donde las partículas valiosas se encuentran más finamente distribuidas (Brito Quezada et al., 2019).

### **1.6.1.3 Funcionamiento y principio de separación**

La mesa vibratoria basa su funcionamiento en la diferencia de densidades entre las partículas del mineral, lo cual permite la recuperación de oro presente en arenas residuales mediante la acción combinada de la gravedad, el flujo de agua y el movimiento vibratorio.

En este tipo de materiales, donde el oro puede encontrarse en tamaños finos o asociado a otras partículas, el proceso de estratificación cobra mayor importancia. Las partículas de mayor densidad tienden a concentrarse en zonas específicas del equipo, mientras que las más livianas son arrastradas por el flujo de agua hacia las zonas de descarga de relaves. Este fenómeno ocurre principalmente en los espacios entre rifles, donde las partículas se organizan en función de su peso específico (Pavez, 2008, citado en Brito Quezada et al., 2019).

## 1.6.2 Concentradores gravimétricos centrífugos (CGC)

La limitación de la Ley de Stokes es la gravedad estándar (g) que es superada por los concentradores gravimétricos centrífugos (CGC), los cuales “multiplican la aceleración efectiva, logrando la captura de partículas que la gravedad por sí sola no podría retener” (Carrasco, 2018, p. 18).

### 1.6.2.1 Principio operacional y fuerza centrífuga

Los CGC operan rotando un cono acanalado a altas velocidades, generando una fuerza centrífuga que varía típicamente entre 60 y 100  $G$ 's (Gupta, 2016). La aceleración centrífuga ( $a_c$ ) se calcula como:

$$a_c = r \cdot w^2$$

Donde  $r$  es el radio del tambor y  $w$  es la velocidad angular.

### 1.6.2.2 Uso de agua de fluidización

Un mecanismo crucial en los CGC es la inyección de agua de fluidización. Esta agua se inyecta radialmente a través de perforaciones en las ranuras del cono. Su función principal es:

Según Tinco (2018), el agua de fluidización reduce la compactación de la cama de minerales que se acumulan en las ranuras. Esto permite que las partículas livianas (ganga) sean suspendidas y arrastradas fácilmente por el flujo, mientras que las partículas de oro, debido a su alta densidad y la intensa fuerza centrífuga, penetran y se retienen en la cama (Wills & Finch, 2015).

## 1.7 Muestreo, leyes y balance de masa

### 1.7.1 Fundamentos del muestreo representativo

El muestreo es la etapa más crítica, ya que cualquier inexactitud o error sistemático en la toma de las muestras de la alimentación (F), el concentrado (C) o el relave (T) puede invalidar el balance metalúrgico (García, 2015). El objetivo es obtener una muestra cuya ley ( $C_x$ ) sea una representación fiel de la población total de ese producto.

Holmes (2004, p. 71) enfatiza la necesidad de minimizar el error fundamental de muestreo, que es inherente a la heterogeneidad del material, especialmente en las arenas residuales donde el oro fino puede estar segregado. Se deben emplear técnicas de muestreo con cortadores transversales o procedimientos de cuarteo normados para asegurar que el material analizado refleje con precisión la masa total procesada.

### 1.7.2 Principio de conservación y balance de masa

El balance de masa es una aplicación de la ley de conservación de la materia, donde la masa de oro que entra al proceso debe ser igual a la suma de la masa de oro que sale en los productos. Es el mecanismo primario para asegurar la consistencia y la exactitud de los datos de rendimiento (Bustamante, Gaviria & Restrepo, 2008).

La ecuación fundamental que rige la contabilidad del oro en el proceso de concentración es:

$$F \cdot C_F = C \cdot C_C + T \cdot C_T$$

Donde:

- $F$ : Masa de la alimentación
- $C$ : Masa del concentrado
- $T$ : Masa del relave
- $C_F, C_C, C_T$ : Ley o concentración de oro en cada flujo (g/t).

### 1.7.3 Parámetros clave de rendimiento metalúrgico

La evaluación del desempeño de un concentrador centrífugo se realiza mediante el cálculo de métricas estándar que miden la eficiencia de captura como la eficiencia de reducción de masa.

#### Código de prácticas AMIRA P754

Para garantizar la calidad y la credibilidad de la evaluación metalúrgica. Es esencial adherirse a códigos de buenas prácticas, como el Código de Prácticas para Contabilidad Metalúrgica de AMIRA (2007). Este código exige la conciliación de datos para asegurar que el balance de masa se cierre dentro de tolerancias aceptables, a menudo utilizando el método de los tres productos (alimentación, concentrado y relave) para calcular una ley conciliada de la alimentación (AMIRA, 2007).

Una de las principales directrices es que se debe establecer “una vigilancia independiente y continua del proceso de muestreo y análisis para detectar sesgos” (AMIRA, 2007, p. 5)

#### 1.7.3.1 Recuperación de oro (%R)

La recuperación es el parámetro más importante, ya que cuantifica la proporción de oro contenido en la alimentación que el equipo logró capturar y transferir al flujo de concentrado. Es la métrica directa de la eficiencia de captura del concentrador centrífugo.

$$\%R = \frac{\text{Masa de oro en concentrado}}{\text{Masa de oro en alimentación}} \times 100 = \frac{C \cdot C_C}{F \cdot C_F} \times 100$$

#### 1.7.3.2 Razón de concentración (RC)

La razón de concentración es el factor que indica cuánto se ha reducido la masa de material a procesar en etapas posteriores (como la lixiviación o fundición). Un *RC* alto implica que se ha eliminado una gran cantidad de material estéril (ganga) de forma eficiente.

$$RC = \frac{\text{Masa de alimentación}}{\text{Masa de concentrado}} = \frac{F}{C}$$

Tabla 4. Parámetros clave para la evaluación del desempeño metalúrgico

Parámetro	Símbolo	Definición	Unidades
Ley de alimentación	C <sub>F</sub>	Concentración de Au en la arena residual	g/t
Ley de concentrado	C <sub>C</sub>	Concentración de Au en el producto final (enrichment)	g/t
Recuperación	%R	Eficiencia de captura del oro por el concentrador	%
Razón de concentración	RC	Grado de reducción de masa a procesar	Adimensional
Factor de gravedad	G	Múltiplo de la aceleración gravitacional terrestre aplicada	G's
Capacidad	Q	Caudal de masa que procesa el equipo	t/h o m <sup>3</sup> /h

*Fuente:* (Elaboración propia basada en Bustamante et al., 2008; Wills & Finch, 2015)

## 1.8 Flotación

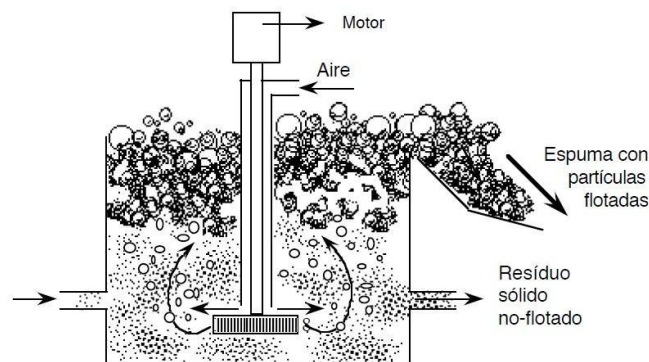
Es un proceso de concentración de minerales de tipo fisicoquímico, utilizado para separar selectivamente minerales valiosos de la ganga mediante la modificación de sus propiedades superficiales, particularmente la hidrofobicidad e hidrofiliidad (Will & Finch, 2016). Este proceso se desarrolla en un sistema trifásico sólido-líquido-gas, donde las

partículas hidrofóbicas se adhieren a burbujas de aire y ascienden formando una espuma rica en el mineral de interés (Fuerstenau & Han, 2003).

### 1.8.1 Proceso

El proceso de flotación inicia con la preparación de una pulpa mineral, la cual consiste en una mezcla de mineral finamente molido y agua. Posteriormente, se adicionan reactivos químicos que permiten modificar las propiedades superficiales de los minerales. Luego, se introduce aire al sistema, generando burbujas que se adhieren a las partículas hidrofóbicas, las cuales ascienden a la superficie formando una espuma que es recolectada como concentrado, mientras que las partículas hidrofílicas permanecen en la pulpa como relave (Gupta & Yan, 2006).

*Figura 3. Proceso de flotación de minerales*



**Fuente:** Meraz Vinaja (s.f.).

Este proceso depende de variables como el tamaño de partículas, el pH, la densidad de pulpa y el tiempo de residencia, las cuales influyen indirectamente en la eficiencia de separación (Wills & Finch, 2016).

### 1.8.2 Maquinaria

La flotación se lleva a cabo principalmente en equipos denominados celdas de flotación, las cuales pueden ser de tipo mecánico o neumático. Las celdas mecánicas utilizan un sistema de agitación para mantener la pulpa en suspensión y dispersar el aire, mientras que las neumáticas emplean aire a presión para generar burbujas (Fuerstenau & Han, 2003)

*Figura 4. Proceso de flotación de minerales*



*Fuente:* 911Metallurgist (s.f.).

Además, el circuito de flotación incluye equipos auxiliares como tanques acondicionadores, donde se preparan los reactivos; bombas de pulpa, que permiten el transporte del material; y sistemas de aireación, fundamentales para la generación de burbujas (Gupta & Yan, 2006).

### 1.8.2 Reactivos

Los reactivos de flotación son sustancias químicas que permiten modificar las propiedades superficiales de los minerales para facilitar su separación. Entre los principales reactivos utilizados se encuentran:

***Colectores:*** incrementan la hidrofobicidad del mineral valioso, facilitando su adhesión a las burbujas de aire.

***Espumantes:*** que favorecen la formación y estabilidad de la espuma.

***Depresores:*** que evitan la flotación de minerales no deseados.

***Modificadores de pH:*** regulan las condiciones químicas del medio.

La selección y dosificación adecuada de estos reactivos es fundamental para optimizar la recuperación y la calidad del concentrado (Taggart, 2004).

## **CAPÍTULO 2**

### **METODOLOGÍA Y ENSAYO EXPERIMENTAL**

#### **2.1 Formulación de la metodología**

La presente investigación es de tipo experimental y aplicada, ya que se orienta a evaluar la eficiencia de un concentrador gravimétrico en la recuperación de oro presente en arenas residuales de baja ley provenientes de un proceso previo de beneficio mineral.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, debido a que se analizan variables medibles relacionadas con las características físicas del material, tales como la distribución granulométrica, parámetros característicos de tamaño de partícula (d50 y d80) y el comportamiento del material durante el proceso de concentración gravimétrica.

El diseño de la investigación es experimental, puesto que se realizaron pruebas controladas utilizando una mesa vibratoria tipo Deister, con el fin de observar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de operación y evaluar la eficiencia del proceso de separación de minerales pesados.

Posteriormente se realizaron pruebas de flotación en una celda del laboratorio Denver Metso D-12, con el propósito de llegar a un producto con mayor tenor, considerándolo como nuestro producto final.

#### **2.2 Localización y descripción del material a utilizar**

El material utilizado en la presente investigación corresponde a arenas residuales provenientes de una planta de beneficio de minerales auríferos, la cual presta servicios de procesamiento a diferentes empresas del sector minero. Esta planta se encuentra ubicada en la provincia del Azuay, cantón Camilo Ponce Enríquez.

Dichas arenas residuales se generan como subproductos del proceso de beneficio del

mineral, luego de que este atraviesa diversas etapas metalúrgicas destinadas a la recuperación del oro.

Una de las primeras etapas a las que fue sometida la muestra fue la trituración, con el objetivo de reducir el tamaño de las rocas hasta un diámetro máximo aproximado de 3 cm, considerado adecuado para continuar con la etapa de molienda.

Posteriormente, el material triturado es procesado en molinos chilenos de cuatro ruedas, los cuales cuentan con tres salidas provistas de malla #80 (180  $\mu\text{m}$ ), permitiendo obtener una pulpa con una granulometría más fina. El flujo resultante pasa a través de dos canales recubiertos de bayetas (lanas de borrego), donde el oro, debido a su alta densidad, tiende a quedar retenido en las fibras de las lanas. Posteriormente estas bayetas son retiradas y sacudidas para recuperar el oro acumulado.

Las arenas que no quedan retenidas continúan su recorrido hacia un sistema de seis piscinas de sedimentación, donde se depositan por gravedad. Una vez sedimentadas, estas arenas son bombeadas hacia tanques con una capacidad de 25 m<sup>3</sup> donde se lleva a cabo el proceso de lixiviación.

En esta etapa, el material es acondicionado mediante la adición de cal, con el fin de regular su pH de la pulpa y alcanzar las condiciones adecuadas para la incorporación de cianuro, el cual permite solubilizar el oro presente en el material. Posteriormente, el metal disuelto es recuperado mediante el proceso de adsorción con carbón activado.

Una vez finalizada la absorción, la pulpa es conducida a través de una criba, donde se realiza la separación entre el carbón activado y las arenas residuales. Generalmente, estas arenas presentan bajas leyes de oro, por lo que son consideradas residuos del proceso y finalmente son depositadas en relaves o depósitos de relaves.

El material proveniente de estos relaves constituye el objeto de estudio de la presente investigación. Para su análisis, será sometido a métodos de concentración gravimétrica,

específicamente mediante el uso de una mesa gravimétrica, aprovechando que los sulfuros poseen una mayor densidad que la ganga. De esta manera, se busca incrementar el tenor del material concentrado, permitiendo valorar nuevamente estas arenas residuales y reducir el desperdicio de minerales potencialmente aprovechables.

## **2.3 Caracterización y preparación de la muestra**

### **2.3.1 Muestreo y preparación de muestras**

Para la realización de la investigación se procedió a la recolección de una muestra representativa de arenas residuales provenientes del proceso de cianuración. La toma de muestra se efectuó en las piscinas de residuos de la planta de procesamiento Promine, ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay.

*Figura 5. Piscinas de arenas residuales de la planta de procesamiento Promine.*



*Fuente:* Elaboración propia

El procedimiento de muestreo consistió en utilizar un tubo de PVC, el cual se introdujo verticalmente en las piscinas de residuos hasta llenar su interior con el material.

Posteriormente, se sellaba el orificio superior del tubo, con el fin de mantener el material contenido dentro del mismo y evitar su pérdida durante la extracción. El material recolectado fue depositado en canecas de 5 galones para su posterior filtrado. Este procedimiento se repitió varias veces hasta recolectar varios recipientes con arenas residuales.

Una vez completada la recolección, el material fue transferido a sacos para su traslado desde el cantón Camilo Ponce Enríquez hacia la ciudad de Cuenca. El transporte se realizó en una camioneta, contando con el respaldo de una guía de transporte proporcionada por la planta de procesamiento, lo que garantizó la legalidad y trazabilidad del material transportado.

Posteriormente, el material recolectado fue extendido sobre sacos durante un periodo aproximado de diez días, con el objetivo de permitir su secado natural y reducir la humedad presente en las arenas. Este proceso facilitó el manejo del material y la correcta realización de las etapas posteriores de preparación de la muestra.

Una vez seco el material, se llevó a cabo el proceso de cuarteo mediante el método de la torta, con el fin de obtener una muestra representativa para su posterior análisis, y valorización.

Este procedimiento consistió en formar una torta con el material, dividirla en partes iguales y seleccionar una porción, descartando la siguiente de manera alternada. Este proceso se repitió cuatro veces, hasta obtener la cantidad de muestra necesaria para el estudio; tal como se muestra en la **figura 6**

*Figura 6. Proceso de cuarteo mediante el método de torta*



**Fuente:** Elaboración propia

A partir de este procedimiento se obtuvieron dos muestras con un peso aproximado de 1 kg cada una. Una de ellas fue enviada para su análisis a un laboratorio certificado, Albexus Laboratorio Minero. La muestra fue remitida mediante servicio de transporte por cooperativa hacia el cantón Camilo Ponce Enríquez, donde fue recibida en la oficina local de la empresa y posteriormente enviada a sus laboratorios ubicados en la ciudad de Piñas para la realización de los análisis correspondientes.

Las muestras fueron identificadas de la siguiente manera:

- Muestra madre
- Testigo de la muestra madre

### **2.3.2 Análisis químico de la muestra**

Para determinar el tenor de oro presente en la muestra, denominada muestra madre, esta fue enviada para su análisis al laboratorio Albexus, ubicado en la ciudad de Piñas, provincia de El Oro. Dicho laboratorio se encuentra certificado y acreditado bajo la norma N.º SAE LEN

19-007, y el informe de resultados fue firmado por la jefa de laboratorio, Cinthia Ríos Aguilar.

El análisis del contenido de oro se realizó mediante el método de ensayo al fuego (Fire Assay), técnica ampliamente utilizada en la industria minera debido a su alta precisión y confiabilidad para la determinación de metales preciosos.

El resultado obtenido para la muestra madre fue el siguiente:

*Figura 7. Resultado del análisis químico de las arenas residuales*

<b>RESULTADOS</b>	<b>Comp.</b>	<b>Cod</b>	<b>Au</b>
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	N°	Alb.	g/t
MUESTRA MADRE	1	52402	0.92

*Fuente:* Informe de resultados de análisis de laboratorio Albexxus4

Este resultado confirma la presencia de oro remanente en las arenas residuales del proceso de cianuración, lo que justifica la aplicación de métodos alternativos de recuperación, como la concentración gravimétrica, con el objetivo de aprovechar los minerales pesados aún presentes en el material y mejorar su valorización.

### **2.3.3 Análisis granulométrico**

La caracterización granulométrica del material se realizó mediante el método de tamizado, utilizando una submuestra representativa de 300 gramos de arenas residuales. Para este análisis se empleó una serie de seis tamices con aberturas progresivamente menores, además de un recipiente de fondo para la recolección del material más fino.

Los tamices utilizados en el ensayo fueron los siguientes:

- Malla #30 – 600  $\mu\text{m}$
- Malla #40 – 425  $\mu\text{m}$
- Malla #50 – 300  $\mu\text{m}$
- Malla #80 – 180  $\mu\text{m}$

- Malla #100 – 150  $\mu\text{m}$
- Malla #200 – 75  $\mu\text{m}$
- Fondo – < 75  $\mu\text{m}$

Figura 8. Equipo de tamices utilizados



Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis granulométrico, obtenidos mediante el ensayo de tamizado se presentan en la **tabla 5**.

Tabla 5. Resultados del análisis granulométrico del material

# Malla	Tamaño ( $\mu\text{m}$ )	Peso retenido (g)	Fracción retenido	Fracción pasante acumulada	Fracción retenida acumulada

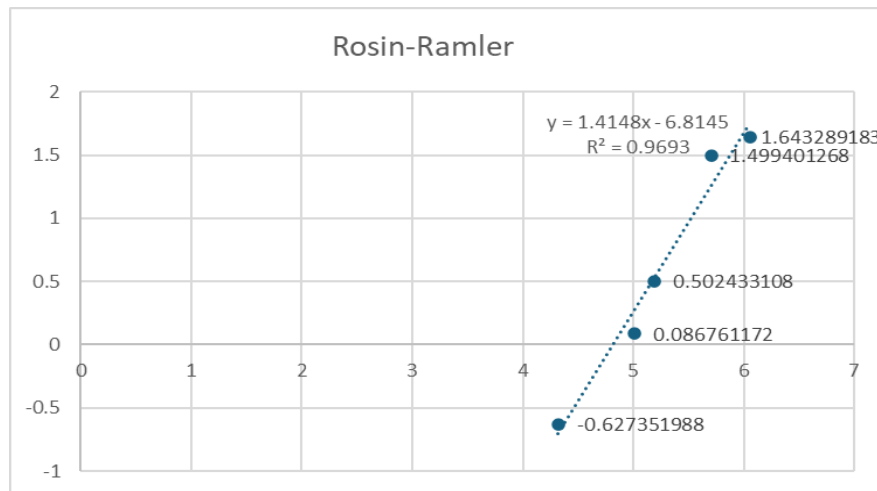
30	600	0.00	0.00	1	0
-30 +40	600	1.70	0.01	1.00	0
-40 +50	425	1.70	0.01	0.99	0.01
-50 +80	300	54.00	0.18	0.99	0.011344678
-80 +100	180	43.30	0.14	0.81	0.191524858
-100 +200	150	75.00	0.25	0.663997331	0.336002669
-200 + Fondo	75	124.00	0.41	0.41374708	0.58625292
SUMA		299.70	1.00	0	1

*Fuentes:* Elaboración propia

Con el fin de describir la distribución granulométrica del material, los datos obtenidos del ensayo de tamizado fueron analizados mediante los modelos de distribución granulométrica de Schuhman y Rosin-Rammler.

El modelo de Rosin-Rammler presentó un mejor ajuste a los datos experimentales, lo que se evidenció en un coeficiente de correlación más cercano a la unidad. Por esta razón, se utilizó este modelo para determinar los parámetros característicos del tamaño de partícula del material analizado.

Figura 9. Ajuste de la distribución granulométrica mediante el modelo de Rosin-Rammler



**Fuente:** Elaboración propia

La presentación gráfica del modelo muestra una relación aproximadamente lineal entre las variables transformadas, lo que indica que este modelo describe adecuadamente la distribución granulométrica del material analizado.

El modelo de Rosin-Rammler se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$R = 1 - e \left[ - \left( \frac{x}{KRR} \right)^m \right]$$

donde:

- R = fracción acumulada pasante
- X = tamaño de partícula ( $\mu\text{m}$ )
- KRR = tamaño característico de la distribución (parámetro de Rosin-Rammler)
- m = parámetro de uniformidad o pendiente de la distribución

A partir de la ecuación obtenida del ajuste lineal del modelo de Rosin-Rammler se determinaron los tamaños de partícula correspondientes al 50% y 80% de material pasante

Los resultados obtenidos fueron:

- d50 = 85.58  $\mu\text{m}$
- d80 = 198.76  $\mu\text{m}$

Estos resultados indican que la mayor parte del material analizado se encuentra dentro de un rango de tamaño relativamente fino, donde aproximadamente el 80% de las partículas presentan tamaños menores a  $198.76 \mu\text{m}$ .

Esta distribución granulométrica resulta adecuada para procesos de concentración gravimétrica mediante una mesa gravimétrica, ya que este tipo de equipos presenta una mayor eficiencia en la recuperación de minerales cuando el material de alimentación se encuentra dentro de rangos granulométricos finos a medios. En este sentido, la granulometría obtenida favorece la liberación de partículas minerales y mejora las condiciones de separación entre los minerales pesados y la ganga durante el proceso de concentración.

En consecuencia, los resultados indican que el material analizado posee características adecuadas para su tratamiento mediante procesos de concentración gravimétrica, lo cual justifica la aplicación de una mesa gravimétrica en el presente estudio.

#### **2.3.4 Determinación de la densidad aparente**

Para la determinación de la densidad del material se aplicaron dos métodos, siendo uno de ellos el método del picnómetro, el cual permite obtener la densidad de materiales finos con un buen nivel de precisión.

En este procedimiento se utilizó un picnómetro previamente revisado que estuviera en buenas condiciones y mediante el registro de pesos se procedió a calcular la densidad de la muestra. Los parámetros considerados para el cálculo fueron los siguientes:

- Peso de la muestra seca ( $P_m$ ).
- Peso del picnómetro lleno con agua ( $P_{pa}$ ).
- Peso del picnómetro con la muestra y agua ( $P_{pma}$ ).

A partir de estos valores se aplicó la ecuación correspondiente para la determinación de la densidad, la cual permite calcular la relación entre la masa del material y el volumen de agua

desplazado para la muestra dentro del picnómetro.

$$\text{Densidad} = \frac{P_m}{P_{ma} + P_{pa} - P_{pma}}$$

Este método es ampliamente utilizado en estudios mineralógicos y metalúrgicos, ya que permite determinar con precisión la densidad de materiales particulados, información importante para evaluar su comportamiento en procesos de concentración gravimétrica.

*Figura 10. Balanza analítica*



*Fuente:* Elaboración propia

- Primer ensayo

#### **Datos**

$P_m = 4$  gramos

$P_{pa} = 29.6$  gramos

$P_{pma} = 32.2$  gramos

**Aplicación**

$$\text{Densidad} = P_m / (P_m + P_{pa} - P_{pma})$$

$$\text{Densidad} = 4 / (4 + 29.6 - 32.2)$$

$$\text{Densidad} = 2.86 \text{ g / cm}^3$$

- Segundo ensayo

**Datos**

$$P_m = 3.8 \text{ gramos}$$

$$P_{pa} = 29.6 \text{ gramos}$$

$$P_{pma} = 32.1 \text{ gramos}$$

**Aplicación**

$$\text{Densidad} = P_m / (P_m + P_{pa} - P_{pma})$$

$$\text{Densidad} = 3.8 / (3.8 + 29.6 - 32.1)$$

$$\text{Densidad} = 2.93 \text{ g / cm}^3$$

- Tercer ensayo

**Datos**

$$P_m = 3.4 \text{ gramos}$$

$$P_{pa} = 29.6 \text{ gramos}$$

$$P_{pma} = 31.8 \text{ gramos}$$

**Aplicación**

$$\text{Densidad} = P_m / (P_m + P_{pa} - P_{pma})$$

$$\text{Densidad} = 3.4 / (3.4 + 29.6 - 31.8)$$

$$\text{Densidad} = 2.83 \text{ g / cm}^3$$

El segundo método para la determinación de la densidad se realizó utilizando probetas graduadas, con el objetivo de estimar la densidad a partir del desplazamiento de volumen.

Para este procedimiento, cada probeta fue llenada inicialmente con agua hasta un volumen de

150 ml. Posteriormente, se agregaron diferentes masas de la muestra de arenas residuales en cada probeta. Una vez incorporado el material, se dejó el sistema en reposo durante un período aproximado de tres días, con el fin de permitir la sedimentación completa de las partículas y obtener una lectura más precisa del volumen final ocupado por el material.

Una vez finalizado el proceso de sedimentación, se registró el volumen final del sistema, lo que permitió determinar el volumen ocupado por la muestra a partir de la diferencia entre el volumen inicial y el volumen final observado. Con estos datos se aplicó la ecuación de densidad, expresada como:

$$Densidad = \frac{masa}{Volumen}$$

*Figura 11. Probetas graduadas.*



**Fuente:** Elaboración propia

- Primer ensayo

### **Datos**

masa = 28.8 gramos

nivel de agua inicial = 150 ml

nivel de agua final = 158 ml

volumen de agua = 8 ml

Densidad = 28.8 / 8

Densidad = 3.69 g / cm<sup>3</sup>

- Segundo ensayo

#### **Datos**

masa = 29 gramos

nivel de agua inicial = 150 ml

nivel de agua final = 157 ml

volumen de agua = 7 ml

Densidad = 29 / 7

Densidad = 4.14 g / cm<sup>3</sup>

Mediante este procedimiento se obtuvieron dos valores adicionales de densidad. Finalmente, estos resultados fueron promediados junto con el valor obtenido mediante el método del picnómetro, obteniendo así un valor promedio de densidad representativo del material analizado.

#### **Densidad total**

$$D_t = \frac{2.86 + 2.93 + 2.83 + 3.69 + 4.14}{5}$$

$$D_t = 3.29 \text{ g/cm}^3$$

### **2.4 Etapa experimental: concentración gravimétrica**

#### **2.4.1 Ensayos de concentración gravimétrica**

Para el proceso de concentración gravimétrica se utilizó una mesa vibratoria tipo Deister, con el objetivo de realizar la separación de los minerales presentes en las arenas residuales en función de sus diferencias de densidad. Este método es ampliamente utilizado en

el procesamiento de minerales para recuperar partículas pesadas, especialmente cuando estas se encuentran asociadas a sulfuros o metales de alto peso específico.

Durante la operación de la mesa se trabajó con un flujo de agua constante de 5,17 l/min, el cual fue previamente determinado de manera experimental. Para ello, se colocó una caneca bajo la salida de la llave de agua, manteniendo el flujo abierto durante un minuto, y posteriormente se midió el volumen recolectado, permitiendo así calcular el caudal utilizado en el proceso.

Como variable experimental, la mesa fue operada a diferentes ángulos de inclinación, específicamente 2°, 3° y 4°, con el fin de analizar cómo influye esta condición en la eficiencia de separación de los minerales pesados presentes en la muestra.

El principio de funcionamiento de la mesa gravimétrica se basa en la diferencia de densidad entre los minerales. Durante el proceso, el movimiento vibratorio combinado con la corriente de agua genera una estratificación del material, donde los minerales livianos, como arenas y lodos, son arrastrados por el flujo de agua hacia la parte superior o zona de relaves de la mesa. En contraste, los minerales más pesados, principalmente sulfuros, tienden a desplazarse y concentrarse en zonas específicas de la mesa debido a su mayor peso específico.

Considerando que el oro puede encontrarse asociado a estos minerales pesados, la aplicación de la concentración gravimétrica permite obtener un concentrado con mayor contenido de oro. De esta manera, se busca evaluar la viabilidad técnica de recuperar oro remanente presente en arenas residuales de baja ley, contribuyendo así al aprovechamiento de materiales que normalmente son considerados desechos del proceso de beneficio.

*Figura 12. Mesa gravimétrica tipo Deister*



*Fuente:* Elaboración propia

- Primer ensayo con inclinación de  $2^\circ$

Se realizó un primer ensayo de concentración gravimétrica utilizando una inclinación de  $2^\circ$  en la mesa vibratoria. La medición del ángulo de inclinación se efectuó mediante una aplicación de nivel instalada en un teléfono celular, lo que permitió ajustar la mesa con una aproximación adecuada para el desarrollo del experimento.

Para este ensayo se trabajó con una muestra de 4 kg de arenas residuales, la cual fue alimentada de manera continua sobre la superficie de la mesa gravimétrica, manteniendo constante el flujo de agua previamente establecido. Durante el proceso, el material se fue distribuyendo a lo largo de la mesa, permitiendo que los minerales de mayor densidad se fueran concentrando en las zonas correspondientes de la mesa.

El tiempo total de operación del ensayo fue de 14 minutos con 50,41 segundos. Durante este proceso se procedió a la recolección de los productos obtenidos en la mesa gravimétrica, los cuales fueron clasificados en concentrado y medios, de acuerdo con las zonas de descarga

del equipo.

Posteriormente, únicamente la fracción correspondiente al concentrado fue sometida a un proceso de secado en horno, con el objetivo de eliminar la humedad presente en el material y poder realizar su pesaje en condición seca, garantizando mayor precisión en los resultados.

Una vez finalizado el secado, se procedió al pesaje del material, obteniéndose un peso de 3,602 kg para la fracción de concentrado, la cual corresponde al producto de mayor interés dentro del proceso, debido a la posible concentración de minerales pesados y oro asociado.

Considerando que la masa inicial alimentada al ensayo fue de 4 kg, este valor representa una recuperación del 90,05 % de la masa total inicial en la fracción de concentrado. Este resultado permite analizar el comportamiento del material durante el proceso de concentración gravimétrica y servirá como referencia para comparar con los ensayos realizados a otros ángulos de inclinación de la mesa vibratoria.

#### Resumen

- Primer ensayo con inclinación de 2°

Tiempo de aplicación = 14:50.41 minutos

Masa de arena de ingreso = 4 kg

Masa de concentrado = 3.602 kg

Razón de concentración = 90.05 %

- Segundo ensayo con inclinación de 3°

#### Resumen

Tiempo de aplicación = 13:41.11 minutos

Masa de arena de ingreso = 4 kg

Masa de concentrado = 2.741 kg

Razón de concentración = 68.53 %

- Tercer ensayo con inclinación de 4°

## Resumen

Tiempo de aplicación = 11:21.87 minutos

Masa de arena de ingreso = 4 kg

Masa de concentrado = 1.112 kg

Razón de concentración = 27.8 %

### 2.4.2 Análisis químico de los concentrados obtenidos

Con el objetivo de evaluar la eficiencia del proceso de concentración gravimétrica, se realizó un análisis químico de los concentrados obtenidos durante los ensayos en la mesa vibratoria.

Durante las pruebas experimentales se obtuvieron tres concentrados o “cabezas”, correspondientes a los diferentes ángulos de inclinación evaluados en la mesa gravimétrica (ángulos 2°, 3° y 4°).

Cada una de estas fracciones concentradas fue recolectada y preparada como muestra representativa para su posterior análisis en laboratorio. Estas muestras fueron enviadas a un laboratorio especializado para determinar el contenido de oro de cada concentrado mediante el método de ensayo al fuego (Fire Assay).

El objetivo de este análisis fue comparar la ley de oro obtenida en los concentrados con la ley inicial de la muestra madre (0.92 g/t Au), con el fin de determinar si el proceso de concentración gravimétrica logró incrementar la concentración de oro en las fracciones pesadas del material.

Los resultados obtenidos permitieron evaluar la eficiencia del concentrador gravimétrico y la viabilidad técnica del proceso para la valorización de arenas residuales de baja ley.

Análisis de muestra de 2°

Masa de arena para analizar = 1.001 kg

Tenor obtenido = 1.05 g / ton

Análisis de muestra de 3°

Masa de arena para analizar = 1.00 kg

Tenor obtenido = 1.02 g/t

Análisis de muestra de 4°

Masa de arena para analizar = 0.50 kg

Tenor obtenido = 1.56 g/t

### **Flotación**

Para el proceso de flotación, primero es necesario preparar una pulpa, la cual consiste en una mezcla homogénea de agua y material sólido. La preparación de la pulpa es un paso fundamental, ya que la proporción de sólidos en la mezcla influye directamente en la eficiencia del proceso de flotación.

Primero obtenemos la densidad de la pulpa con la siguiente fórmula:

$$\rho_p = \frac{1}{\phi_s \left( \frac{1}{\rho_{muestra}} - 1 \right) + 1}$$

$\rho_p$  = densidad de la pulpa

$\phi_s$  = fracción de sólidos

$\rho_{muestra}$  = densidad de muestra

### **Datos**

Fracción de sólidos = 35%

Densidad de muestra = 3.29 g/cm<sup>3</sup>

Densidad de pulpa = 1.3221 g/cm<sup>3</sup>

Ahora con la fórmula de densidad de pulpa en función de masa y volumen obtenemos la masa de pulpa despejando  $m_p$ :

$$\rho_{sp} = \frac{m_p}{v_p}$$

$\rho_{sp}$  = densidad de la pulpa

$m_p$  = masa pulpa

$v_p$  = volumen pulpa

**Datos**

Densidad de pulpa = 1.3221 g / cm<sup>3</sup>

Volumen pulpa = 1000 cm<sup>3</sup> (ya que el ensayo se está efectuando en una celda de 1 litro)

Masa de pulpa = 1322.10 gramos

Con la fórmula de fracción de sólidos despejamos para obtener la masa de sólido que es un dato que necesitamos para la siguiente operación:

$$\phi_s = \frac{m_s}{m_p}$$

$\phi_s$  = fracción de sólidos

$m_s$  = masa sólida

$m_p$  = masa pulpa

**Datos**

Fracción de sólidos = 0.35

Masa de pulpa = 1322.10 gramos

Masa de sólido = 462.735 gramos

Debemos saber que la masa de pulpa es igual a la suma de la masa de sólido más la masa de líquido, por lo tanto:

**Datos**

Masa de sólido = 462.735 gramos

Masa de pulpa = 1322.10 gramos

$m_p = m_s + m_l$

$m_l = 859.365$  gramos

Para calcular el volumen del líquido debemos despejar la fórmula de:

densidad = masa / volumen; dividir la masa por la densidad que en este caso es 1 g/cm<sup>3</sup> y nos da 859.365 cm<sup>3</sup>.

Con estos datos realizaremos nuestra pulpa:

Sólido = 462.735 gramos

Líquido = 859.365 cm<sup>3</sup>

Las cantidades previamente calculadas se depositaron en la celda de flotación del laboratorio con una capacidad de 1 litro para la preparación de la pulpa. El procedimiento consistió en verter inicialmente el agua dentro de la celda y posteriormente agregar el material sólido de manera gradual, mientras el sistema se encuentra en agitación.

Este procedimiento permite favorecer una adecuada mezcla entre el agua y el material sólido, evitando la formación de grumos y garantizando una dispersión homogénea de las partículas dentro de la pulpa. Una vez completada la incorporación del sólido, se continúa con la agitación del sistema para asegurar la correcta preparación de la pulpa, condición necesaria para el posterior desarrollo del proceso de flotación.

Una vez obtenida la pulpa, se procedió al acondicionamiento de la muestra dentro de la celda de flotación. En esta etapa se añadieron 8 gotas del colector Z11, manteniendo la pulpa en agitación durante 15 minutos, con el fin de permitir que el reactivo interactúe adecuadamente con la superficie de los minerales y favorezca su posterior flotación.

Posteriormente, una vez completado el tiempo de acondicionamiento con el colector, se agregó el espumante 350, manteniendo nuevamente la pulpa en agitación durante un período de 5 minutos. Durante estas etapas de acondicionamiento, el sistema se mantuvo sin inyección de aire, permitiendo que los reactivos se distribuyeran uniformemente en la pulpa.

Una vez transcurridos los 5 minutos de agitación con el espumante, se procedió a abrir el suministro de aire en la celda de flotación, manteniéndolo durante aproximadamente 2 minutos, tiempo considerado suficiente para la formación y recuperación del concentrado

espumoso.

Un indicio visual de que el proceso de flotación ha recuperado la mayor parte de los minerales deseados es el cambio de color en la espuma, que pasa de un tono oscuro a blanquecino. Este cambio se debe a que, en esta etapa, comienza a flotar principalmente sílice u otros minerales de ganga, los cuales no son el objetivo de la concentración.

Finalmente, el concentrado obtenido fue recolectado y sometido a un proceso de secado, con el propósito de determinar su peso en condición seca y evaluar el grado de enriquecimiento alcanzado.

*Figura 13. Muestras de concentrado después del proceso de secado*



**Fuente:** Elaboración propia

Posteriormente, el material fue enviado a analizar en el laboratorio para determinar su contenido de oro y así evaluar la eficiencia del proceso de flotación aplicado a las arenas residuales.

Tabla 6. Resultado del análisis químico de los concentrados obtenidos

RESULTADOS	Comp.	Cod	Au
IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	N°	Alb.	g/t
MUESTRA MADRE	1	53136	6.07
2 GRADOS	1	53137	3.49
3 GRADOS	1	53138	5.69
4 GRADOS	1	531339	10.31

*Fuente:* Informe de resultados de análisis de laboratorio Albexxus4

Con la aplicación de la fórmula:

$$Ata = Ttt + Ctc$$

A = peso de alimento

Ta = tenor de alimento

T = peso de colas

tt = tenor de colas

C = peso de concentrado

Tc = tenor de concentrado

- Muestra madre:

A: 0.462 kg

ta: 0.92 g/t

T: 0.3824 kg

tt: 0.15 g/t

C: 0.0796 kg

tc: 6.07 g/t

- Ensayo de 2 grados:

A: 0.462 kg

ta: 1.05 g/t

T: 0.3966 kg

tt: 0.64 g/t

C: 0.0654 kg

tc: 3.49 g/t

- Ensayo de 3 grados:

A: 0.462 kg

ta: 1.02 g/t

T: 0.4222 kg

tt: 0.57 g/t

C: 0.0398 kg

tc: 5.69 g/t

- Ensayo de 4 grados:

A: 0.462 kg

ta: 1.56 g/t

T: 0.4187 kg

tt: 0.65 g/t

C: 0.0433 kg

tc: 10.31 g/t

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 Sistematización y revisión de resultados

Luego de realizar los ensayos correspondientes a la muestra madre en la mesa vibratoria con el diferenciador aplicado que es el ángulo de inclinación de la mesa, para obtener los concentrados mediante la fuerza gravimétrica.

Se obtuvieron tres concentrados en los que se evidenció una reducción en la masa de la muestra que se aplicó como alimento, y con los ensayos al fuego practicados en un laboratorio certificado de la ciudad de Piñas corroboramos un mayor tenor en comparación con nuestro tenor de alimento, el cual era de 0.92 g/t Au.

Con el objetivo de obtener un material mineralizado más rico en oro, la muestra fue procesada mediante flotación. Como resultado, se evidenció una reducción de masa en conjunto con un incremento en el tenor de los concentrados, lo cual generó un producto final de mayor calidad.

#### 3.2 Resultados de análisis de concentración gravimétrica

El estudio partió de una muestra de arena mineralizada que se denominó muestra madre, la cual previamente se envió a la ciudad de Piñas al laboratorio Albexus para realizar un ensayo al fuego para obtener el tenor de la muestra madre, dando un tenor de 0.92 g/t Au.

La muestra madre, al ser procesada en la mesa gravimétrica con el diferenciador de inclinación de concentración, generó concentrados de diferente masa y con el ensayo al fuego realizado por la empresa Albexus, se constató que cada concentración tiene un valor de ley de oro (Au). En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos para cada ensayo efectuado en la mesa gravimétrica.

Tabla 7. Resultados en la mesa gravimétrica.

Variación de inclinación	Masa de alimento (kg)	Masa de concentrado (kg)	Ley de Au de cantidad resultante (g/ton)	Recuperación de oro (%)
2 grados	4	3.602	1.05	90.05
3 grados	4	2.741	1.02	68.53
4 grados	4	1.112	1.56	27.08

**Fuente:** Elaboración propia

Para evaluar la eficiencia del proceso de flotación, se determinó la recuperación metalúrgica del oro mediante la aplicación de la siguiente ecuación:

$$R = \frac{tc \cdot C}{ta \cdot A}$$

Los concentrados obtenidos en la concentración gravimétrica los sometimos al proceso de flotación en unas celdas de laboratorio tipo Denver, obteniendo un resultado más rico en oro. Para conocer los tenores de nuestros concentrados luego de la flotación, aplicamos ensayo al fuego a cada concentrado en los laboratorios de la empresa Albexxus. Los resultados obtenidos los detallamos en la siguiente tabla:

Tabla 8. Resultados de la flotación.

Descripción de la muestra	Masa de alimento (kg)	Masa del concentrado(kg)	Ley de Au de cantidad resultante de concentrado (g/ton)	Recuperación de oro (%)
Muestra madre	0.462	0.0796	6.07	17.23
2 grados	0.462	0.0654	3.49	14.16
3 grados	0.462	0.0398	5.69	8.61
4 grados	0.462	0.0433	10.31	9.37

**Fuente:** Elaboración propia

A partir de los resultados, el concentrado de la mesa vibratoria aplicado con la variante de inclinación de 4 grados ( $4^{\circ}$ ) dio un mayor tenor y menor recuperación másica en comparación con los otros ensayos aplicados.

## CONCLUSIONES

- Se cumplió satisfactoriamente con el objetivo general al evaluar la eficiencia del concentrador gravimétrico en la recuperación de oro presente en las arenas residuales de baja ley de la planta Promine.
- El proceso demostró viabilidad técnica para procesar un material con un tenor inicial de 0.92 g/t Au, logrando otorgar un valor económico y aprovechamiento óptimo a estos residuos metalúrgicos.
- Se logró caracterizar las propiedades de las arenas residuales de baja ley, lo que permitió identificar con precisión el contenido de oro inicial y definir que el material era apto para someterse a una separación por densidad.
- Se ejecutó el diseño y la aplicación metodológica de la concentración gravimétrica en la mesa vibratoria, determinando que la variante de inclinación influye directamente en el proceso. La inclinación de 4 grados demostró ser la más selectiva para este tipo de material.
- Se analizó la viabilidad técnica de aplicar la concentración gravimétrica como método de valorización, complementándola con el proceso de flotación en celdas Denver. El análisis confirmó que el circuito acoplado incrementa significativamente la ley del concentrado final para su posterior comercialización.
- La caracterización de las arenas residuales de la planta Promine corroboró que, a pesar de ser un desecho, el material alberga valores económicamente recuperables (0.92 g/t). Este comportamiento es consistente con lo señalado por Vilcapoma & Chávez (2012, p. 11), quienes explican que los relaves o arenas de desecho de plantas de beneficio concentran fracciones mineralizadas debido a ineficiencias en las etapas previas.

- Los resultados obtenidos en la mesa gravimétrica determinaron que la variación a 4 grados de inclinación fue la más eficiente, reduciendo la masa del concentrado a 1.112 kg y elevando la ley a 1.56 g/t. Este fenómeno coincide con lo planteado por Brito Quezada et al. (2019), quienes afirman que ajustar de forma óptima el ángulo de inclinación de la mesa optimiza la acción de la película fluida, permitiendo un descarte más selectivo de las partículas estériles.
- La implementación secuencial del proceso de flotación en celdas Denver para enriquecer el preconcentrado gravimétrico ratificó la viabilidad técnica del circuito.
- Este incremento en el tenor final del concentrado concuerda con las investigaciones de Rivera (2017), donde se demuestra que los circuitos mixtos (gravimetría-flotación) superan la eficiencia de los métodos unitarios al procesar arenas finas o de difícil liberación.

## RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas adicionales variando parámetros operacionales como el caudal de agua de lavado, la densidad de pulpa y la alimentación de concentrador gravimétrico para optimizar al máximo la recuperación de oro en la planta Promine
- Evaluar y comparar técnicamente la eficiencia de la mesa vibratoria frente a otros equipos de concentración gravimétrica, tales como las separadoras concentradoras o concentradoras centrífugas, para determinar qué tecnología ofrece la mejor razón de concentración según la granulometría del residuo.
- Ampliar el estudio de concentración gravimétrica mediante la evaluación de un rango más detallado de inclinaciones de la mesa vibratoria, particularmente en valores próximos a 2°, 3° y 4°, con el fin de identificar condiciones de operación que permitan alcanzar un mejor equilibrio entre recuperación de oro y ley del concentrado.
- Optimizar de manera rigurosa el consumo de agua y la dosificación de reactivos utilizados en el proceso de flotación en las celdas Denver, con la finalidad de reducir los costos operativos evaluados en la viabilidad técnica.
- Desarrollar análisis de caracterización mineralógica avanzada (como microscopía electrónica o difracción de rayos X) al concentrado final obtenido, siguiendo las metodologías analíticas aplicadas en los trabajos de Vilcapoma & Chávez (2012), para identificar la presencia de otros elementos valiosos o minerales complejos antes de su venta.
- Implementar pruebas piloto a escala semi-industrial basadas en los parámetros de diseño validados en este estudio y en la literatura de Brito Quezada et al. (2019) y Rivera (2017), con el propósito de verificar si la selectividad de la mesa a 4 grados y el rendimiento del circuito acoplado se mantienen estables bajo condiciones reales de operación continua.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIRA. (2007). *Código de Prácticas para la Contabilidad Metalúrgica*.
- Acosta Fiallos, F., & Feijoo Loayza, C. (2020). *Recuperación de oro mediante concentración gravimétrica utilizando concentradores tipo Z*.
- Brito Quezada, J. G. (2019). *Evaluación de parámetros operativos en concentración gravimétrica*. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad del Azuay: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9590/1/15223.pdf>
- Bustamante Rúa, M. O., Gaviria Cartagena, A. C., & Restrepo Baena, O. J. (2008). *Concentración de minerales: Notas de clase de la asignatura*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/9590/1/15223.pdf>
- Cárdenas Argudo, L. M., & Gavilanes Cordero, M. K. (2018). *Análisis y optimización de costos de producción del sistema de explotación de minerales metálicos, caso de aplicación Produmin S.A. y Minervilla Cía. Ltda.* Obtenido de Repositorio Universidad del Azuay: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8419>
- Carrasco, C. (2018). *Influencia de la presión de agua y la fuerza de gravedad centrífuga en la recuperación de oro mediante concentración gravimétrica centrífuga para un mineral tipo antracita*. Obtenido de la Universidad Nacional de Trujillo.
- Castro, R. (2022). *Comparación de procesos de concentración gravimétrica entre emsa vibratoria y espiral para la obtención de un concentrado de óxido de hierro (FeO)*. Obtenido de Repositorio Universidad del Azuay: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11581>
- Espinoza S., L. A., Iriarte D., G., Espinoza S., L. O., Gutarra B., R., Herrera M., M., Zamalloa B., J., . . . Torres G., J. A. (2021). Importancia de la mineralogía en la geometalurgia: aplicación en Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 24(48), 85-94.
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Gupta, A. (2016). *Mineral Processing: Design and Operati3n*. Elsevier.
- Holmes, R. J. (2004). Correct sampling and measurement-the foundation of accurate metallurgical accounting. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 74(1), 71-83.
- Londoño García, R. (2015). *Balance de masa y energía sin reacciones químicas*.

- Marsden, J., & House, L. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* (2 ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).
- Pavez, O. (2008). *Concentración gravimétrica de minerales*.
- Paz-Barzola, D., Escobar-Segovia, K., & Jiménez-Oyola, S. (2022). Evaluación de la calidad del suelo en núcleos poblados cercanos a la zona minera aurífera de Ponce Enríquez. *Enfoque UTE*, 13(4), 29'38. Obtenido de <https://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v13n4/1390-6542-enfoqueute-13-04-00029.pdf>
- Rivera Parra, S. C. (2017). *Optimización de concentración gravimétrica de oro en la mesa vibratoria de la mina "Vicentina"*. Obtenido de Repositorio Institucional Universidad del Azuay: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7028>
- Rodríguez León, F. P. (2024). *Estudio de concentración gravimétrica natural y centrífuga de minerales auríferos aluviales. Experimentación y simulación: Simulación del sistema de concentración gravimétrica natural mediante mesa vibratoria*. Obtenido de Repositorio Digital Escuela Politécnica Nacional: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25331>
- Rodríguez Ceferino, B. W. (1996). *Estudio mineralúrgico de concentración gravimétrica y flotación para recuperación de oro*.
- Roldán Vargas, S. (2021). *Ley de Stokes*. Técnicas Experimentales Básicas.
- Soto, G. C. (2012). *Diccionario Minero*. Otros Mundos AC.
- Soria-Aguilar, M. J., & Carrillo-Pedroza, F. R. (2021). *Ensaye al fuego de muestras tipos óxidos de un proceso gravimétrico*.
- Taggart, A. F. (2004). *Handbook of Mineral Dressing*. Wiley.
- Tinco, W. (2018). *Diseño de un sistema automático de dosificación de reactivos en la empresa Pionner Mining*. Obtenido de Repositorio Universidad Mayor de San Andrés: <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/22112/PG2246.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Valdivieso, A. L., Amaya Ibarra, A., Olivia Rangel, S., & Reyes Bahena, J. L. (1999). *Concentración Gravimétrica Centrífuga*. Obtenido de [http://www.metsoendress.com/miningandconstruction/mct\\_service.nsf/WebWID/WTB-120118-22576-3D956/SFile/166.pdf](http://www.metsoendress.com/miningandconstruction/mct_service.nsf/WebWID/WTB-120118-22576-3D956/SFile/166.pdf)
- Villacrés Torres, H.M. (1991). *Caracterización de arenas previo a la cianuración*.

- Whitworth, A. J., Forbes, E., Verster, I., Jokovic, V., Awatey, B., & Parbhakar-Fox, A. (2022). Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Cleaner Engineering and Technology*, 7, 1000451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>
- Wills, B. A., & Finch, J. (2015). *Wills' Mineral Processing Technology; An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8 ed.). Butterworth-Heinemann.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology* (8 ed.). Elsevier.

## ANEXOS

*Anexo 1. Transporte de arenas residuales*



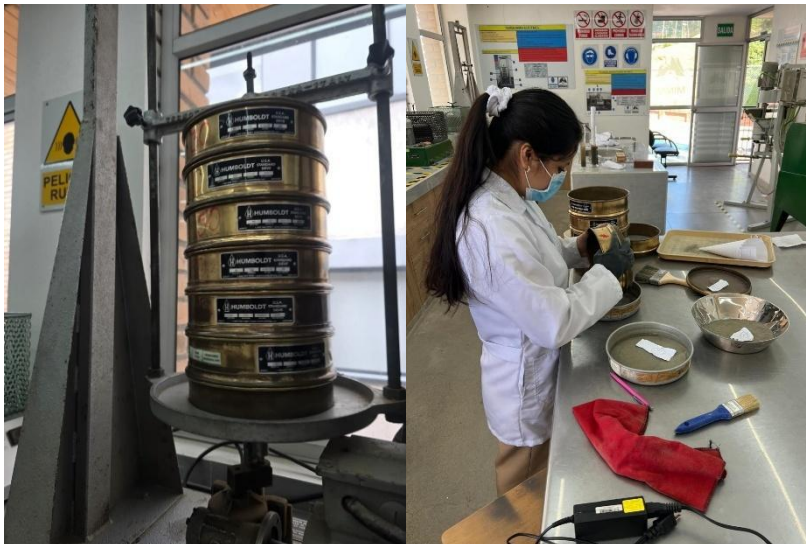
*Anexo 2. Secado natural de las arenas residuales*



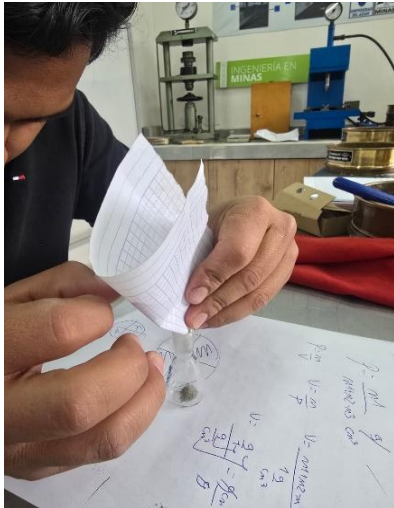
*Anexo 3. Secado, acondicionamiento y pesaje de arenas residuales para análisis granulométrico*



*Anexo 4. Tamizado granulométrico del material residual*



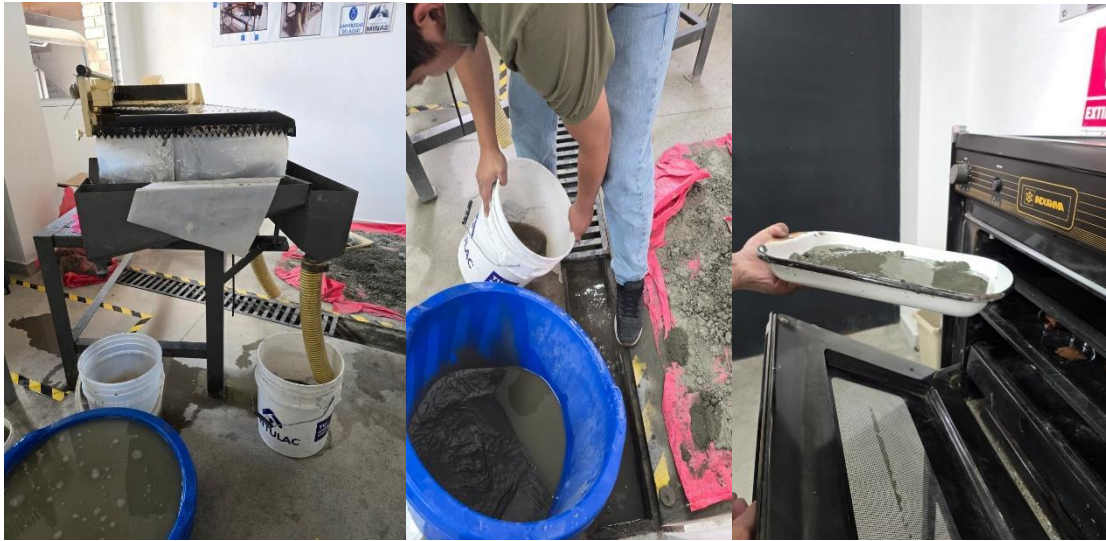
*Anexo 5. Colocación de la muestra en el picnómetro*



*Anexo 6. Preparación y envío de muestras al laboratorio*



*Anexo 7. Concentración gravimétrica y secado del material*



*Anexo 8. Preparación del concentrado para análisis de laboratorio*



*Anexo 9. Proceso de flotación*

