



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Recuperación de minerales mediante la utilización de un  
concentrador gravimétrico tipo Z”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS**

**Autores:**

JIMMY PATRICIO JAPA SUQUILANDA

HARMAN LEONARDO SANANGO ZARUMA

**Director:**

ING. FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

**CUENCA – ECUADOR**

**2022**

## **DEDICATORIA**

Con la inmensa facilidad que me llena el culminar mis tan ansiados estudios, le doy gracias a Dios por oportunidad y la fuerza concedida para lograr este sueño.

A mis padres, en especial a mi Madre Dioselina, que se sacrificó día a día para que yo pudiera cumplir mi tan preciado sueño, además me demostró que con el esfuerzo y el trabajo se puede lograr todo en esta vida y que aun en los momentos más difíciles supo apoyarme al igual que mi Papá que siempre supo apoyarme, comprenderme y enseñarme todo lo que sé de la vida y que ahora está desde el cielo cuidándonos y guiándonos.

A mis hermanos, que han creído en mí y han sabido aceptarme, tenerme paciencia y que de una u otra forma han contribuido para lograr esto.

Y a toda mi familia que han estado a mi lado a lo largo de todo es proceso, esto es por ustedes y nunca olvidaré lo que cada uno de ustedes hizo por mí.

**Jimmy Japa**

## **DEDICATORIA**

Quiero extender mi más sincero agradecimiento a Dios, máximo ingeniero creador de todo lo existente, a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es la vida y lo justa que puede llegar a ser; a mi padre, Segundo Sanango que me ha enseñado que el mejor conocimiento que se puede tener, es el que se aprende por sí mismo, a mi madre Carmen Zaruma quien me enseñó que incluso la tarea más grande se puede lograr si se hace un paso a la vez, esto está dirigido a ellos por brindarme siempre su apoyo incondicional y guía moral, para poder actuar de una manera correcta, mediante su intachable ejemplo.

A mis hermanos, Katerin y Kevin, razón suficiente para no rendirme ante la adversidad y seguir adelante. A todos mis familiares y amigos gracias por estar presente no solo en esta etapa tan importante de mi vida, sino en todo momento ofreciéndome lo mejor y buscando la excelencia para mí persona por darme la mano cuando lo necesitaba, porque sin su ayuda no podría estar donde estoy ahora.

**Leonardo Sanango Z.**

## **AGRADECIMIENTO**

Un agradecimiento sincero a nuestra querida Universidad del Azuay, que a diario nos ayuda al conocimiento, forjando profesionales conscientes y comprometidos con la sociedad, agradecidos por haber sido parte del proceso de aprendizaje logrando poder culminar un peldaño más de nuestros estudios.

A nuestros maestros por transmitirnos sus conocimientos y su dedicación, que los ha regido, por lo cual hemos logrado importantes objetivos como culminar el desarrollo de esta tesis con éxito.

A nuestros familiares por estar con nosotros y apoyarnos para no decaer a lo largo de este camino, el cual nos permitió recopilar conocimientos y gratos momentos entre compañeros, amigos y toda esta familia que conformamos la Escuela de Minas.

A Ecuacorriente.SA que también contribuyo en los estudios de uno de nosotros.

Jimmy Japa - Leonardo Sanango

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA</b> .....	i
<b>DEDICATORIA</b> .....	ii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	iii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	vii
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b> .....	viii
<b>RESUMEN</b> .....	ix
<b>ABSTRACT</b> .....	x
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	3
<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	3
1.1 Sistemas gravimétricos de recuperación .....	3
1.1.1 Índices metalúrgicos .....	3
1.1.2 Balance de masa en un concentrado .....	3
1.2 Fundamentos teóricos de la concentración gravimétrica .....	4
1.2.1 Clasificación de los índices metalúrgicos.....	4
1.2.2 Relación entre la Recuperación (R) y la razón de enriquecimiento (Re) ....	7
1.3 Concentración gravimétrica.....	8
1.4 Concentración de flujo laminar.....	12
1.5 Funcionamiento del canalón tradicional.....	16
1.6 Requerimientos necesarios para una eficiente concentración gravimétrica .....	17
1.7 Criterio de concentración (CC).....	18
1.8 Concentración mediante la clasificadora tipo “Z” .....	19
1.9 Estado del arte.....	20
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	22
<b>METODOLOGÍA</b> .....	22
2.1. Obtención y preparación de la muestra .....	22
2.1.1. Determinación de densidades de las muestras .....	23
2.2. Diseño y construcción del concentrador tipo “Z” .....	25
2.3. Dosificación de la muestra .....	28
2.3.1 Metodología del ensayo .....	30
2.4. Determinación de parámetros operacionales .....	31

2.4.1 Caudal (Q).....	32
2.5. Procesamiento de las muestras.....	32
2.6 Procesamiento de resultados.....	33
2.6.1 Recolección del concentrado. ....	33
2.6.2 Recolección del relave o colas. ....	33
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>35</b>
<b>RESULTADOS</b> .....	<b>35</b>
3.1 Resultados de los ensayos.....	35
3.2 Interpretación de los resultados .....	40
3.3 Análisis y comparación de los resultados.....	42
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>44</b>
Conclusiones.....	44
Recomendaciones .....	46
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>48</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>51</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Esquema de un concentrador con dos productos. ....	4
<b>Figura 1.2.</b> Relación entre la Recuperación y la razón de enriquecimiento en una operación de concentración en una solo etapa. ....	7
<b>Figura 1.3.</b> Perfil de la velocidad de un fluido en un plano inclinado. ....	12
<b>Figura 1.4.</b> Infiltración y recorrido de la partícula a través de la capa de fluido. ....	13
<b>Figura 1.5.</b> Fuerzas que actúan sobre la partícula dentro del mando de fluido. ....	14
<b>Figura 1.6.</b> Cambio de flujo laminar a turbulento por la presencia de obstáculos. ....	16
<b>Figura 1.7.</b> Criterio de concentración CC a diferentes diámetros de partículas C. ....	19
<b>Figura 2.1.</b> Localización de obtención de la muestra. ....	22
<b>Figura 2.2.</b> Concentrador Z. ....	25
<b>Figura 2.3.</b> Canalón 1. ....	26
<b>Figura 2.4.</b> Canalón 2. ....	26
<b>Figura 2.5.</b> Canalón 3. ....	27
<b>Figura 2.6.</b> Concentrador tipo Z. ....	27
<b>Figura 2.7.</b> Elaboración del concentrador tipo. ....	28
<b>Figura 2.8.</b> Preparación de muestras en laboratorio. ....	29
<b>Figura 2.9.</b> Escala de concentración $SiO_2/Fe_2O_4$ . ....	31
<b>Figura 3.1.</b> Desarrollo de ensayo 1. ....	35
<b>Figura 3.2.</b> Resultado ensayo 1. ....	36
<b>Figura 3.3.</b> Resultados ensayo 2. ....	37
<b>Figura 3.4.</b> Resultados ensayo 3. ....	37
<b>Figura 3.5.</b> Resultados ensayo 4. ....	38
<b>Figura 3.6.</b> Resultados ensayo 5. ....	39
<b>Figura 3.7.</b> Gráfica de Puntos de Magnetita. ....	40
<b>Figura 3.8.</b> Gráfica de concentraciones de Sílice. ....	41
<b>Figura 3.9.</b> Concentraciones de magnetita y sílice. ....	41
<b>Figura 3.10.</b> Ecuación de regresión lineal. ....	42

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b> Índices de un concentrador. ....	8
<b>Tabla 1.2.</b> Equipos de Concentración Gravimétrica. ....	10
<b>Tabla 2.1.</b> Ensayos a realizar. ....	30
<b>Tabla 2.2.</b> Condiciones de los ensayos a realizar. ....	33
<b>Tabla 3.1.</b> Resultados de concentración. ....	39

## ÍNDICE DE ANEXOS

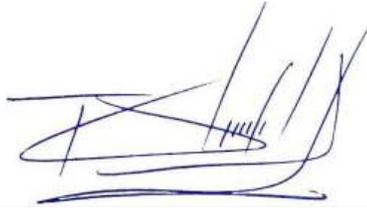
Anexo 1. Lugar de extracción del mineral ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).....	51
Anexo 2. Secado el mineral de Magnetita. ....	52
Anexo 3. Tamizado del material denso.....	53
Anexo 4. Tamizado del material liviano.....	54
Anexo 5. Determinación de densidades.....	55
Anexo 6. Material para la construcción del equipo. ....	56
Anexo 7. Construcción del equipo.....	57
Anexo 8. Instalación de bomba de agua. ....	58
Anexo 9. Sistema de rifles alternativo (no utilizado). ....	59
Anexo 10. Prueba de funcionamiento.....	60
Anexo 11. Desarrollo de ensayos. ....	61
Anexo 12. Recolección y cuarteo de concentrados. ....	62
Anexo 13. Interpretación de resultados del ensayo 1. ....	63
Anexo 14. Interpretación de resultado del ensayo 2.....	63
Anexo 15. Interpretación de resultados del ensayo 3. ....	64
Anexo 16. Interpretación de resultados ensayo 4.....	64
Anexo 17. Interpretación de resultados ensayo 5.....	65

**“RECUPERACIÓN DE MINERALES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE  
UN CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO TIPO Z”**

**RESUMEN**

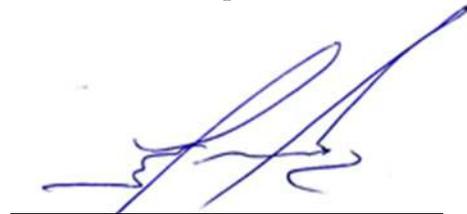
El presente proyecto investigó la eficiencia de un concentrador gravimétrico tipo Z a escala de laboratorio, para ser utilizado en la concentración de minerales. Para ello, fue necesario el diseño, la construcción del mencionado concentrador y la adecuación del mismo dentro de las instalaciones del laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay. Posteriormente, se realizaron ensayos con una mezcla de sólidos de óxido de hierro, magnetita como mineral principal, combinada con sílice, variando en cada ensayo el ángulo de inclinación de los canalones por donde se transporta el material. Los resultados obtenidos se procesaron para realizar una estimación visual de la concentración de magnetita conseguida en cada ensayo, obteniendo una concentración máxima del 90% con un ángulo de inclinación de 17°, denotando que a mayor ángulo de inclinación mayor será también la recuperación del óxido en la mezcla tratada.

**Palabras clave:** Concentración gravimétrica, concentrador Z, recuperación, canalón.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

**Director del Trabajo de Titulación**



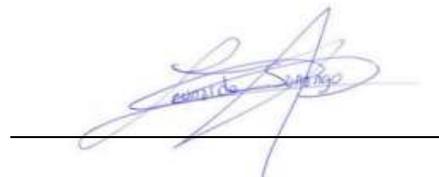
Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

**Coordinador de Escuela**



Jimmy Patricio Japa Suquilanda

**Autor**



Harman Leonardo Sanango Zaruma

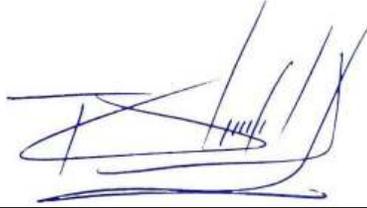
**Autor**

**“MINERAL RECOVERY THROUGH THE USE OF A Z-TYPE GRAVITY  
CONCENTRATOR.”**

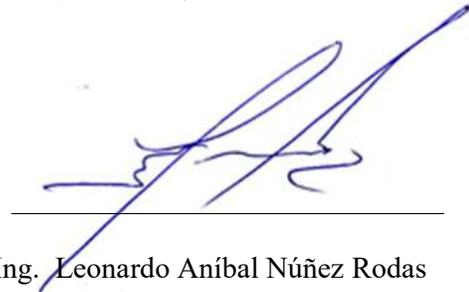
**ABSTRACT**

This project investigated the efficiency of a Z-type gravimetric concentrator at laboratory scale, to be used in the concentration of minerals. For this purpose, it was necessary to design, build and adapt the concentrator within the laboratory facilities of the School of Mining Engineering of the University of Azuay. Subsequently, tests were carried out with a mixture of iron oxide solids, magnetite as the main mineral, combined with silica, varying in each test the angle of inclination of the chutes through which the material is transported. The results obtained were processed to make a visual estimation of the magnetite concentration achieved in each test, obtaining a maximum concentration of 90% with an inclination angle of 17°, indicating that the greater the angle of inclination, the greater the recovery of the oxide in the treated mixture.

**Keywords:** Gravimetric concentration, Z concentrator, recovery, chute.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela  
**Director of the Degree Project**



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas  
**Coordinator of the School**



Jimmy Patricio Japa Suquilanda  
**Author**



Harman Leonardo Sanango Zaruma  
**Author**

Jimmy Patricio Japa Suquilanda

Harman Leonardo Sanango Zaruma

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Febrero, 2022

## **“RECUPERACIÓN DE MINERALES MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE UN CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO TIPO Z”**

### **INTRODUCCIÓN**

La concentración mineral es la operación de aumentar el contenido o la concentración (expresada en porcentaje) de un mineral o minerales mediante el uso de un dispositivo de separación sólido-sólido, produciendo así la separación de dos o más minerales, según las diferentes densidades propias de cada material, obteniendo un concentrado adecuado del mineral de interés. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

En las actividades minero extractivas desarrolladas en el oriente ecuatoriano existe una baja eficiencia en la obtención de mineral aluvial, debido a una mala aplicación de técnicas para la recuperación gravimétrica, lo cual conlleva a los mineros a utilizar agentes químicos como el mercurio, para obtener una mayor recuperación del oro. La baja recuperación de mineral que se obtiene en las concesiones aluviales en el territorio ecuatoriano se debe a: la mala aplicación de técnicas, falta de procesos innovadores, tecnológicos y modernos. Todo esto es generado por el desconocimiento de métodos modernos y amigables con el medio ambiente, por parte de los concesionarios.

Para el presente análisis se va utilizar un concentrador gravimétrico tipo Z, que es una herramienta, que aplica los principios físicos de los diferentes materiales para concentrar el mineral de interés. El concentrado gravimétrico ha demostrado ser un

método idóneo para la minería de oro aluvial, debido a que es de fácil construcción, es económico, de fácil manejo y permite obtener buenos resultados.

En el presente estudio se considerará variar el ángulo de inclinación de los canalones y la fracción de sólidos que ingresa al sistema. Una vez realizado el ensayo de laboratorio se procederá a determinar las condiciones de operación idóneas, para concentrar un porcentaje alto del mineral a estudiar.

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Sistemas gravimétricos de recuperación

##### 1.1.1 Índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos asumen en todos los casos que la separación y los muestreos se realizan en estado estacionario, esto se da cuando las variaciones de las propiedades del sistema son invariantes en el tiempo, es decir que, si no se encuentra el sistema en estado estacionario sino en estado transitorio, lo que ingresa al equipo y/o proceso no es igual a lo que sale, debido a una acumulación de masa dentro de los equipos. Sin embargo, las condiciones de operación no garantizan que un muestreo genere datos invariantes en el tiempo. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

##### 1.1.2 Balance de masa en un concentrado

Producto de un concentrador se obtienen dos corrientes, que se conocen como concentrados y colas. En las corrientes existe material expuesto conocido como flujos másicos los cuales según el tipo de corriente se presentan con letras mayúsculas mientras que los tenores se representan con letras minúsculas. Para un balance general, el flujo másico de mineral que entra tendrá que ser igual al flujo másico de mineral que sale. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

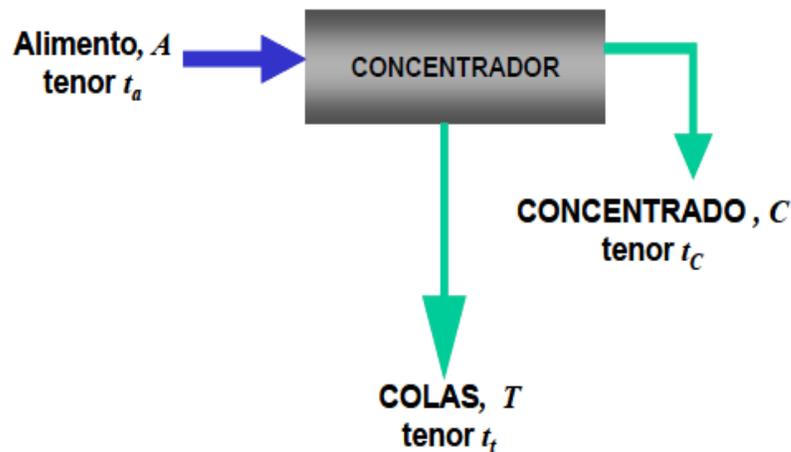
Por lo tanto:

$$A = C + T \quad (1)$$

Realizando un balance específico, se tiene que el mineral de interés que entra, es igual al mineral de interés que sale. Ampliando las variables de la formula anterior, y adjuntando los términos conocidos como tenores se obtiene la siguiente ecuación:

$$A * t_a = C * t_c + T * t_t \quad (2)$$

A través de una representación gráfica se puede apreciar la explicación de la ecuación 2 en donde se puede apreciar que el último término corresponde a las pérdidas de mineral de interés que se escapan del proceso desarrollado en el concentrador y se pierden en el tenor de las colas. El término restante corresponde a la otra corriente que sale del concentrador, la cual tendrá un tenor mayor de mineral de interés en comparación con el tenor de la corriente de alimento.



**Figura 1.1.** Esquema de un concentrador con dos productos.

**Fuente.** (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

## 1.2 Fundamentos teóricos de la concentración gravimétrica

### 1.2.1 Clasificación de los índices metalúrgicos

#### Índices De Calidad

- Recuperación ( $R$ ).

Se define como un factor resultante de un proceso de concentración, que relaciona el peso del material de interés que se obtiene en el concentrado, con el peso del mineral que ingresó en el proceso de concentración (alimento) (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

$$R = \frac{\text{Peso del mineral de interés en el concentrado}}{\text{Peso del mineral de interés en el alimento}} \quad (3)$$

De acuerdo al balance específico, se plantea lo siguiente:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Peso del mineral de interés} \\ \text{en concentrado} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Peso de} \\ \text{concentrado} \end{array} \right) * \left( \begin{array}{c} \text{Tenor de} \\ \text{concentrado} \end{array} \right) = C * t_c$$

De la misma manera se obtiene el peso de mineral útil en la corriente de alimento:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Peso del mineral de interés} \\ \text{en alimento} \end{array} \right) = A * t_a$$

Combinando las fórmulas anteriores, se obtiene:

$$R = \frac{C * t_c}{A * t_a} \quad (4)$$

- Razón de enriquecimiento ( $R_E$ )

Este índice se define como la relación que existe entre el tenor (o porcentaje) de mineral útil en el concentrado, respecto al tenor (o porcentaje) del mismo mineral en la alimentación, entonces:

$$R_E = \frac{tc}{ta} \quad (5)$$

El valor de la razón de concentración  $R_E$ , en una operación de concentración, debe ser siempre mayor que la unidad. En el caso de que  $R_E$  se iguale a la unidad, quiere decir que el tenor del concentrado ( $tc$ ), es igual al tenor de alimento ( $ta$ ) y esto iría contra el objetivo de esta operación unitaria que es aumentar la concentración del mineral. Por otro lado, mientras más lejano este de la unidad (y que sea mayor que ella) mejor será la concentración; lo que quiere decir es que se está enriqueciendo aún más el concentrado respecto al tenor de alimento (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

- Índice de selectividad  $I.S$

Este índice compara la calidad de separación entre dos especies (A) y (B) que se desean separar en el proceso de concentración. Se define matemáticamente con la siguiente relación (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

$$I.S = \frac{ta(A)*tt(B)}{ta(B)*tt(A)} \quad (6)$$

Donde  $ta(A)$  y  $ta(B)$  son los tenores de los componentes (A) y (B) en la alimentación de la operación. Los tenores  $tt(A)$  y  $tt(B)$  son de los componentes (A) y (B) en las colas respectivamente.

- Razón de concentración ( $RC$ )

Es la razón entre el flujo másico de sólidos en la alimentación A con respecto al flujo de sólidos en el concentrado C.

$$RC = \frac{A}{C} \quad (7)$$

Nótese que este índice no da información de calidad, sino de capacidad. Este índice permite relacionar los flujos que entraron y salieron del separador, permitiendo calcular por ejemplo cuantas toneladas se debe alimentar para producir una tonelada de concentrado (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

- Rendimiento de concentración ( $V$ )

Se define como la relación entre un flujo masivo en el concentrado respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC} \quad (8)$$

- Eficiencia de la Separación ( $E$ )

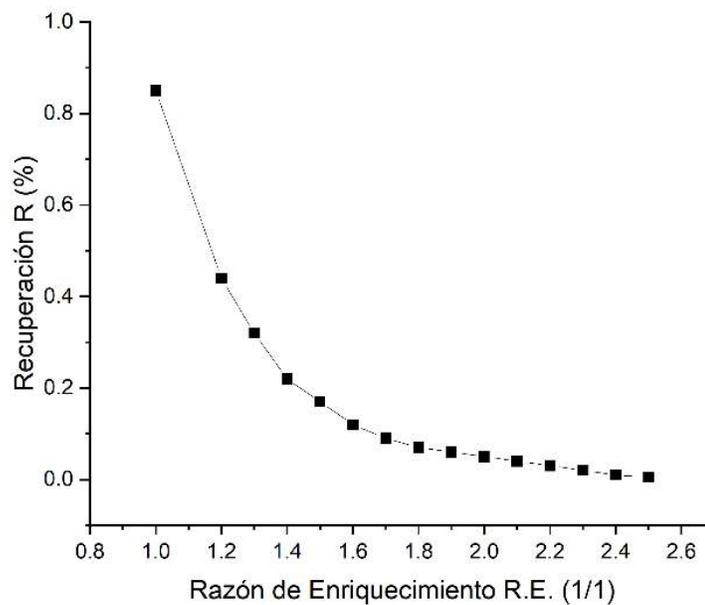
Es un índice que combina la información obtenida en los anteriores índices metalúrgicos. El cual se define en la siguiente ecuación (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008):

$$E = \frac{R-V}{1-V_{IDEAL}} \quad (9)$$

Donde  $V_{IDEAL}$  es el rendimiento ideal.

### 1.2.2 Relación entre la Recuperación ( $R$ ) y la razón de enriquecimiento ( $Re$ )

Normalmente en una operación de concentración, los índices de Recuperación  $R$  y la razón de enriquecimiento  $Re$  son completamente antagónicos.



**Figura 1.2.** Relación entre la Recuperación y la razón de enriquecimiento en una operación de concentración en una solo etapa.

**Fuente:** (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

Lo anterior implica que solo es posible alcanzar una recuperación alta y una razón de enriquecimiento también alta, si la separación se efectúa por etapas, lo que es prácticamente imposible que en una única etapa se pueda alcanzar ambos objetivos. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

**Tabla 1.1.** Índices de un concentrador.

NOMBRE DEL ÍNDICE METALURGICO	EXPRESIÓN DEL ÍNDICE IDEALMENTE	ÍNDICES EN TERMINOS DE TENORES
Recuperación: R	$R_{IDEAL} = 1.0$	$R = \left[ \frac{t_a - t_t}{t_c - t_t} \right] \frac{t_c}{t_a}$
Razón de Enriquecimiento: $R_E$	$R_{IDEAL} = 1/t_a$	$R_E = \frac{t_c}{t_a}$
Índice de Selectividad: I.S	$I.S_{IDEAL} \rightarrow \infty$	$I.S = \frac{t_a(A) * t_t(B)}{t_a(B) * t_t(A)}$
Razón de Concentración: RC	$RC_{IDEAL} = 1/t_a$	$RC = \frac{t_c - t_t}{t_a - t_t}$
Rendimiento: V	$V = t_a$	$V = \frac{t_a - t_t}{t_c - t_t}$
Eficiencia de Separación: E	$E = 1.0$	$E = \frac{(t_a - t_t)(t_c - t_a)}{t_a(t_c - t_t)(1 - t_a)}$

**Fuente:** (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

### 1.3 Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es esencialmente un método que se utiliza para separar partículas minerales de diferentes pesos específicos, mediante la aplicación de diferentes fuerzas a los equipos que generan movimientos en respuesta a las fuerzas que ejercen sobre ellos, considerando como fuerzas a la gravedad y/o otras fuerzas, como la hidráulica y de fricción. (López, Ibarra, Rangel, & Reyes, 1999)

En esencia, las partículas de mineral son separadas en virtud de su diferencia de densidad, cuanto más grande es la diferencia de densidad entre dos minerales, más fácilmente pueden ser separados. Sin embargo, las partículas muy pequeñas, presentan mayor resistencia a la fuerza de gravedad y se vuelven inestables, debido a la viscosidad del fluido, haciendo que, disminuya bruscamente la eficiencia de la concentración gravimétrica (Martínez & Pagán, 2011).

### Fundamentos y criterios de aplicación

El principio que explica la concentración por medio de gravedad es el “Asentamiento obstaculizado”, es decir, la velocidad de mayor o menor de asentamiento de partículas de diferente tamaño y peso, en un medio líquido, que contiene a su vez partículas finas del mismo sólido, las cuales obstaculizan o retardan la caída de las partículas que se pretende diferenciar por su velocidad de asentamiento (Villas & Sanchez, 2006).

La presencia de gran cantidad de partículas más finas entorpece el proceso de separación (Villas & Sanchez, 2006).

El criterio fundamental; sin embargo, es el peso, o, mejor dicho, la relación entre los pesos específicos de la mena y ganga, con la del medio líquido, que se expresa como (Barsky, Swainson, & Hedley, 1934):

$$\text{Criterio de concentración} = Q = \frac{D_p - D_m}{D_l - D_m} \quad (10)$$

#### Donde:

- $D_p$  = Densidad de partículas pesadas.
- $D_l$  = Densidad de Partículas Livianas.
- $D_m$  = Densidad del Medio Fluido de separación.

Si “Q” es mayor a 2.5, entonces la concentración por gravedad es relativamente sencilla. Si el valor de “Q” es menor a 2.5, la eficiencia de separación decrece, y por debajo de 1.25, la separación no es comercialmente posible (Villas & Sanchez, 2006). Si suponemos una densidad del líquido igual a 1, y de la ganga igual a 2.5, resulta recomendable que el valor del criterio de concentración sea igual a 2.5, con lo cual la densidad (mínima recomendable) de la mena pesada resulta de 4.75 (Castillo, 2014).

Se comprende fácilmente que mientras mayor sea la diferencia entre densidades de menas pesadas vs la ganga, el proceso será más eficiente, y se toma especial

consideración, que la presencia de partículas finas de ganga, que forman una suspensión con el agua, debido a su menor densidad que el material de interés, pero con una viscosidad mayor, es particularmente negativo, por disminuir la velocidad de asentamiento obstaculizado de las partículas útiles, de menas pesadas (Villas & Sanchez, 2006)

### Equipos de concentración gravimétrica

Los principales equipos de concentración gravimétrica más usados en la industria minera se los puede clasificar según el mecanismo de aplicación siendo: convencionales y centrífugos, dentro de los cuales los principales son (Castillo, 2014):

**Tabla 1.2.** Equipos de Concentración Gravimétrica.

CONVENCIONALES	CENTRÍFUGOS
JIGS	FALCON
ESPIRALES	KNELSON
MESAS VIBRATORIAS	

**Fuente:** (Castillo, 2014).

### Métodos de separación por gravedad

En general, los métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías principales (Castillo, 2014):

- 1. Separación por medios densos:** en el cual las partículas se sumergen en un baño que contiene un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas flotan y otras se hundan (Castillo, 2014).
  - Las partículas son sumergidas en un líquido de densidad intermedia, donde las más livianas flotan mientras que las de mayor peso específico precipitan.
  - Para una eficiente separación en medios densos, se deben cumplir las siguientes condiciones:

- El medio denso debe tener una viscosidad lo más baja posible a fin de disminuir las fuerzas de interacción sólido-líquido, permitiendo una adecuada velocidad de asentamiento.
- El material que modifica la densidad del fluido para la generación del medio denso, debe tener el mayor peso específico posible, a fin de no aumentar la viscosidad al momento de incrementar la densidad del fluido.
- Se debe producir un fluido de viscosidad mínima y muy estable para mantener sus propiedades con la agitación mínima (Tupiza, 2019)

**2. Separación por corrientes verticales:** en la cual se aprovechan las diferencias entre velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas, como es el caso del JIG (Castillo, 2014) . Los mecanismos que controlan esta estratificación son: (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008):

- La aceleración diferencial al inicio de la caída.
- La sedimentación obstaculizada.
- Un nivel de energía potencial mínimo.
- El escurrimiento intersticial.

**Separación en corrientes superficiales de agua o “clasificación en láminas delgadas”**, como es el caso de las mesas concentradoras y los separadores de espiral. Siendo este factor el principio utilizado en la clasificadora “Z” en el canalón tradicional y de la “Mesa Gemeni”, también en concentradores centrífugos, mesas vibratorias, y concentradores en espiral. El proceso está basado en la concentración en corriente continua de una pulpa; donde se obtendrá la formación de capas de partículas, las cuales estarán estratificadas en función de su peso específico, las livianas quedarán en la parte superior y las pesadas en el fondo de la superficie del dispositivo (Tupiza, 2019).

### 1.4 Concentración de flujo laminar

La película de líquido, generalmente agua, o también llamado flujo laminar consiste en hacer fluir el líquido en forma de una capa a lo largo de un plano inclinado, en este flujo se puede identificar una velocidad máxima ( $V_e$ ) que se encuentra en la superficie y una velocidad mínima ( $V_o$ ) que se encuentra en contacto con la superficie de contacto.

El espesor ( $e$ ) de la pulpa en el canalón, depende de varios parámetros, tales como: el caudal de alimentación, longitud e inclinación del plano inclinado ( $\alpha$ ), la viscosidad de la pulpa, rugosidades de la superficie y obstáculos opuestos a la circulación de la corriente (Tupiza, 2019).

$$NRe = \frac{\rho_f v e}{\mu} \quad (11)$$

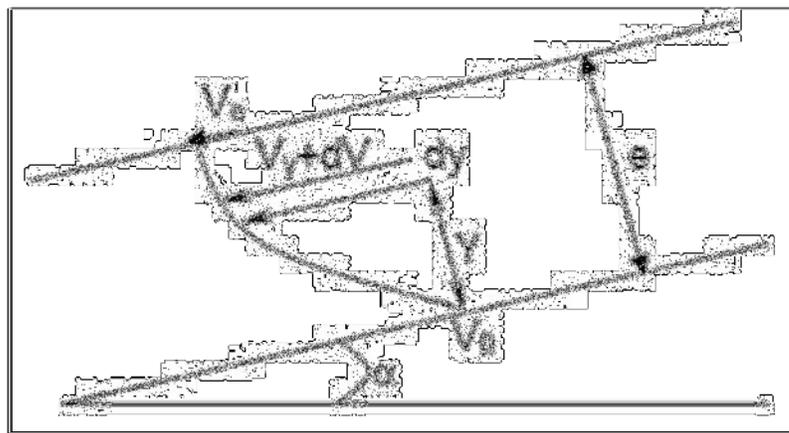
Con:

$\rho_f$  = Densidad del fluido. (kg./ m<sup>3</sup>).

$v$  = Velocidad del fluido. (m.s<sup>-1</sup>).

$e$  = Espesor del film. (m).

$\mu$  = Viscosidad dinámica de fluido. (N.s.m<sup>2</sup>)

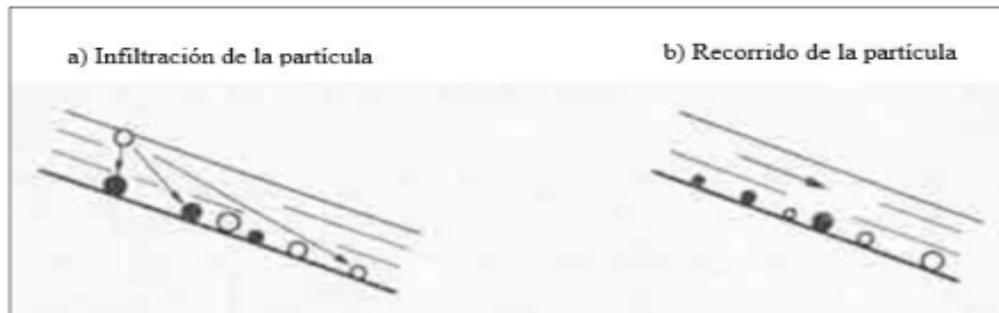


**Figura 1.3.** Perfil de la velocidad de un fluido en un plano inclinado.

**Fuente:** (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

### Infiltración a través del manto fluido

Se refiere al comportamiento de la partícula al momento de traspasar la capa del fluido desde la parte superior hasta la superficie del plano inclinado, la duración de este proceso está determinada por varios factores como: la densidad de la pulpa, espesor de la capa de pulpa, la velocidad de la corriente o caudal, el peso específico y la morfología de las partículas. Mediante este proceso las partículas están sometidas a fuerzas de deslizamiento y sedimentación por gravedad; la duración de la caída de la partícula determinará la posición final de la misma en el plano inclinado, mientras más gruesa sea la partícula, mayor será la distancia de arrastre, igualmente, mientras mayor es el peso específico, menor será la distancia a la que es arrastrada, tal como se muestra en la figura 1.4.

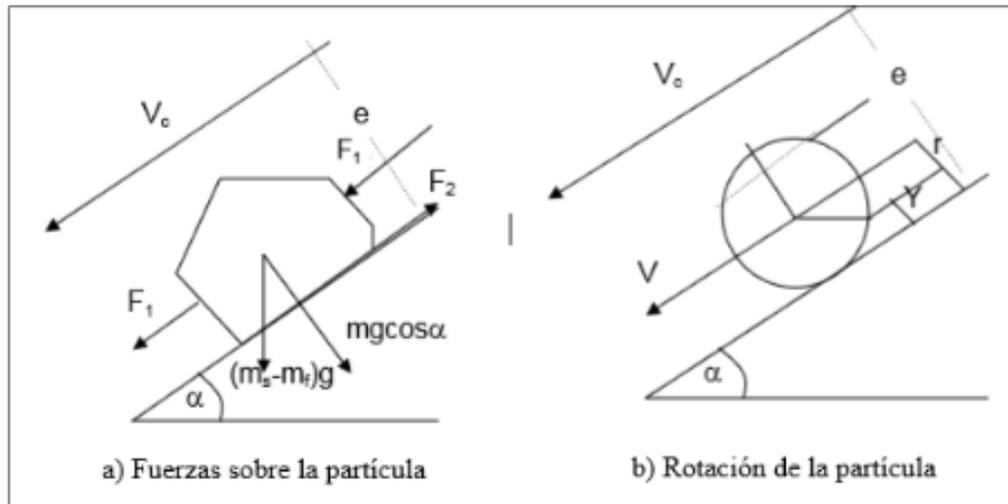


**Figura 1.4.** Infiltración y recorrido de la partícula a través de la capa de fluido.

**Fuente:** Modificado de (Houot, Joussemet, Yong, & Baeza, 1995).

### Distancia recorrida al plano inclinado

Existen dos tipos de transporte de partículas en un fluido las cuales son: De fondo (saltación y rodado) y de suspensión: en función del peso específico, del tamaño y morfología de las partículas. Estas estarán sometidas a diferentes fuerzas independientemente de si están o no en contacto con el plano inclinado. La fuerza de empuje ( $F_1$ ) producida por el líquido sobre la partícula no es constante, esta varía según la posición de la partícula; y las partículas de mayor tamaño transmiten un momento que provoca la rotación de las mismas, además la fuerza de gravedad que actúa sobre la partícula tiene dos componentes: una perpendicular al plano inclinado y una paralela al mismo, lo que favorece el movimiento. La fuerza de fricción ( $F_2$ ) es contraria al movimiento de la partícula pues se opone al mismo (Tupiza, 2019).



**Figura 1.5.** Fuerzas que actúan sobre la partícula dentro del mando de fluido.

**Fuente:** (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

$$F1 = [ms - mf]g \sin \alpha \quad (12)$$

$$F2 = [ms - mf]r \cos \alpha = N\mu \quad (13)$$

F3: Es la fuerza de interacción fluido – partícula o fuerza de arrastre. F3 es difícil de calcular; debido a que ella no solo depende de la forma y orientación de la partícula sino también del movimiento partícula – fluido.

Además, el fluido tiene una velocidad que es función de la profundidad. De hecho, F3 se compone de dos fuerzas opuestas. Una es la fuerza del fluido sobre la partícula actuando aguas abajo y la otra es la resistencia del fluido que la partícula experimenta debido a su movimiento. (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

Pueden obtenerse soluciones analíticas haciendo una sumatoria de fuerzas que actúan sobre todos los elementos individuales de la partícula. Esto se puede hacer para una partícula esférica si se asume que la resistencia del fluido es la misma a través del régimen del fluido por el cual atraviesa la partícula. Esto inmediatamente excluye los regímenes newtonianos y de transición (Pranthal) cerca a la base inferior, debido a las bajas velocidades; siendo el régimen que domina el proceso el de Stokes. Por ende, la

ley de Stokes debe ser utilizada para una solución matemática – una suposición que es razonable, considerando las velocidades tan bajas y los tamaños finos que generalmente se involucra. Con base en las oposiciones anteriores, (Gaudin, 1939) desarrollo la ecuación para hallar el valor de F3.

Asumiendo condiciones en régimen de Stokes, la fuerza del fluido dF3 para un elemento rdβ sobre el perímetro de la esfera es:

$$dF3 = 6\pi\mu(Vf - Vs)rd\beta \quad (14)$$

Donde Vf velocidad de fluido en posición β y Vs es la velocidad de partícula.

Como el perfil de velocidad del fluido es:

$$Vf = \frac{(\rho g \text{sen}(\alpha))(2e-y)y}{2\mu} \quad (15)$$

Se tiene que:

$$F3 = -9\pi^2\rho g\Gamma^3 \text{sen } \alpha + 12\pi^2\rho g\Gamma^2 \text{sen } \alpha - 12\pi^2\mu\Gamma Vs \quad (16)$$

Esta ecuación al derivarla de la ecuación de movimiento de partículas, no se puede usar para otras formas, debido a que F3 debe ser calculado independientemente por ecuaciones propias, por lo que se sugiere métodos numéricos para hallar el balance de fuerzas a partir de ecuaciones diferenciales de movimiento.

Para evitar dicho problema, (Gaudin, 1939) introduce un coeficiente de aproximación, K, el cual para una esfera es de  $2\pi$ , reemplazando en la ecuación anterior, se obtiene:

$$F3 = 2(-9\pi^2\rho g\Gamma^3 \text{sen } \alpha + 12\pi^2\rho g\Gamma^2 \text{sen } \alpha - 12\pi^2\mu\Gamma Vs) \quad (17)$$

### **Dilatación de la pulpa**

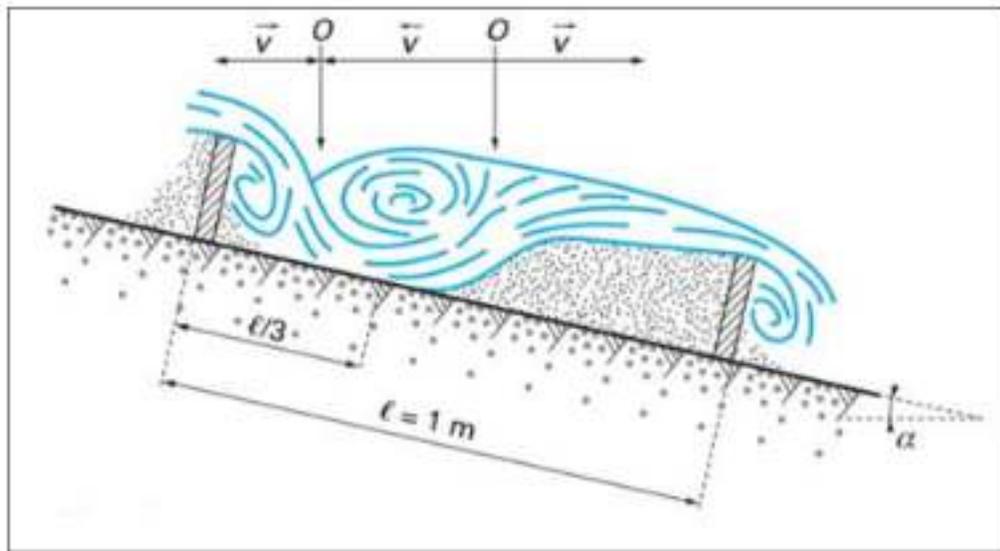
Es una acción combinada que realiza la fuerza de empuje con el líquido. En el cual tiene un cambio de flujo laminar a flujo turbulento, por la obstrucción que producen las partículas más finas y planas; esto obliga a las más gruesas a saltar sobre ellas, produciendo el levantamiento de arrastre secundario de las partículas livianas, debido a que se forman turbulencias junto a las partículas gruesas (Balsea, 2018).

### Estratificación del flujo

Las partículas obstruyen la estratificación, lo que provoca un retardo en el movimiento, con excepción de las partículas muy finas ya que estas logran escurrirse y pasar por partículas grandes. Al mismo tiempo las partículas ligeras de mayor tamaño, tienden a flotar sobre una capa de partículas pesadas y son expulsadas hacia la parte superior de la capa de fluido, produciendo una expulsión selectiva (Bouchard, 2001).

### 1.5 Funcionamiento del canalón tradicional

El canalón tradicional es utilizado para la recuperación de minerales en grano (oro aluvial) en el Ecuador, debido a la simplicidad de su mecanismo y la facilidad de construcción e implementación. El canal inclinado utiliza una corriente de agua abundante y rápida, cuya agitación no es suficiente para mantener las partículas en suspensión, en el canal se implementan una serie de rifles, que son obstáculos instalados artificialmente para producir el cambio de régimen de flujo, de laminar o turbulento, el cual favorece a la caída y al depósito de la partícula.



**Figura 1.6.** Cambio de flujo laminar a turbulento por la presencia de obstáculos.

**Fuente:** Modificado de (Blazy & Joussemet, 2011)

Con estas condiciones se logra que las partículas más densas logren depositarse en primer lugar sin recorrer grandes distancias a través del canal, mientras que los espacios entre los rifles se enriquecen de manera progresiva con minerales pesados, hasta que el canalón este completamente saturado de mineral.

Una vez que el canalón está completamente saturado se paraliza la operación y se procede a retirar el material retenido, esta acción es muy común en los sitios en donde se utilizan dragas (Tupiza, 2019).

### **1.6 Requerimientos necesarios para una eficiente concentración gravimétrica**

Para una buena obtención de mineral por concentración gravimétrica se debe considerar los siguientes aspectos:

#### **a) Liberación de las partículas:**

Una adecuada concentración gravimétrica parte de la premisa de contar con una liberación del mineral adecuado, si las partículas mixtas compuestas por mena y ganga no obtienen una evidente separación, no se producirá una concentración óptima, esta liberación fue propuesta por (Bouchard, 2001) como “Malla de liberación”.

Debido a esta característica, la concentración gravimétrica es recomendada para la explotación de depósitos detríticos, ya que, en estos, el mineral de interés principalmente oro se encuentra de forma libre.

#### **b) Distribución de tamaños en la alimentación:**

El comportamiento hidráulico de una partícula de tamaño pequeño con peso específico elevado como el de una partícula de tamaño mediano y con peso específico bajo, será el mismo, de aquí la importancia de tener una distribución granulométrica no muy amplia, ya que la velocidad de sedimentación es muy importante en el proceso de concentración gravimétrica y depende tanto de la densidad como el tamaño de las partículas (Tupiza, 2019).

#### **c) Criterio de concentración:**

Es un índice introducido por (Taggart, 1996), que describe la disposición que tiene un mineral para separarse de la ganga por métodos gravitacionales, sin tener en cuenta la morfología de las partículas.

**d) Disponibilidad de agua:**

La concentración gravimétrica generalmente se la realiza en medios acuosos, para ello es indispensable contar con la disponibilidad de agua suficiente para el proceso de beneficio. La calidad del agua también podría afectar la eficiencia de la concentración, debido a que cuando el agua este cargada con una gran cantidad de limos, produce que el agua se vuelva viscosa y a su vez influye en la hidrodinámica del proceso.

En casos de tener la necesidad de utilizar aguas con limos en suspensión, es necesario que el agua atraviese un proceso de aclarado en piscinas de sedimentación para disminuir la turbidez del agua (Orellana, 2005).

**1.7 Criterio de concentración (CC)**

El requisito principal para poder realizar una concentración gravimétrica es que exista una diferencia de densidades entre los sólidos que conforman la ganga, si las densidades son iguales o aproximadas, tendrán el mismo comportamiento durante su flujo, lo que volvería completamente inservible el proceso de separación, la diferencia mínima entre las densidades de los sólidos en la ganga se lo define como el criterio de concentración (CC) necesario para una adecuada separación gravimétrica; y está representado en la siguiente fórmula:

$$CC = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (18)$$

**Donde:**

$\rho_p$ = Densidad del mineral pesado.

$\rho_l$ = Densidad del mineral ligero.

$\rho_f$ = Densidad del fluido o pulpa.

En una aplicación práctica, se recomienda tener un valor de CC que sea de 2.5 o mayor, ya que con valores inferiores se vuelve ineficiente. Pero también se debe considerar otros criterios como: el tamaño de la partícula que tiene gran importancia también, como se muestra en la figura 1.7. El oro tiene un amplio rango de tamaño para su

recuperación de ganga silícea, al igual que la galena, a diferencia de la esfalerita que es aplicable a partículas mayores a 500 micrones.

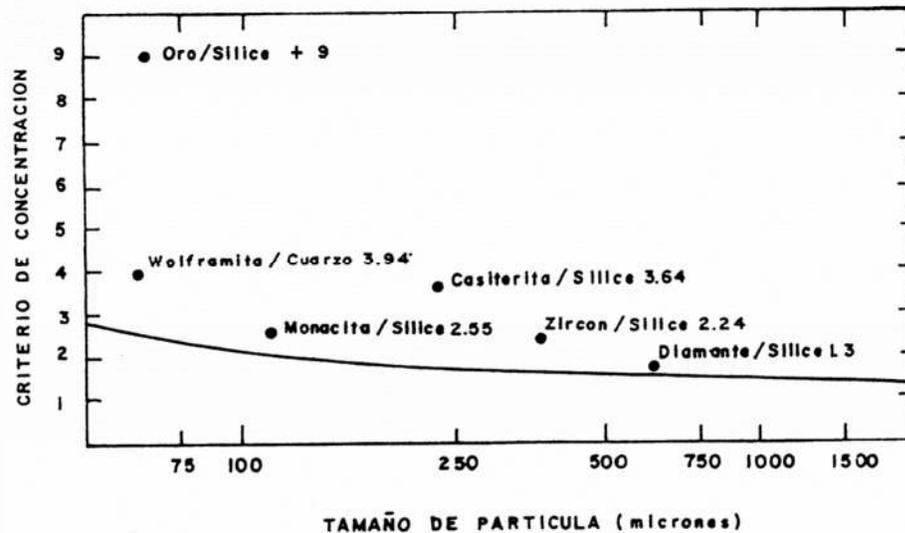


Figura 1.7. Criterio de concentración CC a diferentes diámetros de partículas C.

Fuente: Tomado de (Burt, 1984)

### 1.8 Concentración mediante la clasificadora tipo “Z”

#### Descripción de la clasificadora tipo “Z”

Son concentradores de mineral que poseen canalones colocados uno sobre otro montados en una estructura que asemeja la letra Z, de allí su nombre, y los canalones poseen ángulos que van entre 11° y 30° de inclinación. Este equipo es muy utilizado en el Ecuador para la minería aurífera aluvial, tal y como lo menciona, (Tupiza, 2019). Su gran aceptación se debe a la simplicidad de construcción y funcionamiento, no necesita personal especializado para su operación, lo que refleja que su operación sea razonablemente económica.

Por otro lado, considerando que no tiene una eficiencia definida, ya que variará por las características de la ganga, al ser un dispositivo estático que no permite cambiar la inclinación, se estima que la eficiencia se verá ligeramente afectada, que es un punto básico en nuestra investigación.

Finalmente, se puede mejorar la eficiencia del proceso adicionando en serie otros concentradores. Para lo cual se recomienda colocar un canalón primario, seguido de un JIG primario. (Acosta & Feijoo, 2020)

Los minerales comunes en los depósitos aluviales son la magnetita, ilmenita, granate y tantalita y los metales preciosos como oro, plata, y metales del grupo del platino.

### **Características de la clasificadora “Z”**

Es una planta de clasificación sencilla y fácil de transportar, en la parte superior consta de una tolva de alimentación con una inclinación suficiente, para que el material baje por gravedad y por el agua a presión, hacia criba de clasificación para eliminar las partículas más grandes (cantos gruesos). Debajo de esta criba se encuentra el primer canalón en donde se deposita el mineral grueso en riffles debido a su alta densidad, la superficie bajo estos riffles se encuentra cubierta por una capa gruesa de césped sintético, alfombras especiales o capas de yute y sobre esta cobertura se coloca una malla metálica con el fin de aumentar la efectividad de captación de mineral denso.

El segundo canalón se encuentra debajo y en sentido contrario y con las mismas características del canalón anterior y su función es atrapar las partículas del tamaño medio y finalmente en el tercer canalón recoge el mineral fino y de los restos de mineral que se encuentran en las colas y que no lograron ser atrapados en los canalones anteriores.

### **1.9 Estado del arte**

La concentración gravimétrica es la más utilizada tanto en minería artesanal como en pequeña y mediana minería de aluviales alrededor del mundo, debido que se puede aplicar en ambientes: semi-congelados como en Alaska, tropicales como en América latina o hasta en desérticos tales como África y Australia.

En países como Ecuador, Colombia, Perú, Brasil por nombrar a algunos, está extendido el uso de concentradores tipo Z incluso reemplaza al canalón simple tradicional y se consolida como una planta de procesamiento asequible y funcional tal y como lo describe Ruiz Agudelo en su trabajo “La importancia del desarrollo de

nuevas alternativas tecnológicas para la eliminación del uso del mercurio en la minería nacional” que fue publicada en el 2018.

En el territorio ecuatoriano el funcionamiento de plantas de procesamiento tipo “Z” ha dado grandes beneficios, principalmente en la extracción de oro aluvial al lograr una recuperación de hasta el 98% de mineral, según estudios realizados por la revista FIGEMPA en diciembre del 2020.

Conforme a lo que describe Jimena Sarabia en su trabajo de titulación, la planta concentradora tipo “Z” es un equipo simple, de fácil funcionamiento y generalmente un equipo rustico que soporta un gran rango de calidad y cantidad en la alimentación y permite un funcionamiento de hasta 12 horas diarias de trabajo manteniendo una recuperación superior al 80%.

Refiriéndonos al documento sobre “Plan de manejo ambiental para la explotación aluvial de oro y platino en el municipio de Condoto Choco” realizado por Julián Yáñez Montaña divulgado en el año 2014 plasma la versatilidad del concentrador tipo “Z” para trabajar en una explotación ya sea solo o en conjunto con equipos centrífugos KNELSON, TROMEL Y SCRUBBER.

## CAPÍTULO 2

### METODOLOGÍA

#### 2.1. Obtención y preparación de la muestra

Para efectos de aplicación del experimento, se procedió a preparar un material que contiene dos minerales cuya propiedad diferencial es el peso específico, el cual presenta una diferencia considerable siendo la sílice y la magnetita. El material aluvial considerado como magnetita se obtuvo del río Zamora; en la parroquia Bomboiza, cantón Gualaquiza. (Ver figura 2.1).



**Figura 2.1.** Localización de obtención de la muestra.

**Fuente:** Tomado de Google Earth

Lo que respecta al material de sílice, fue utilizado el que se disponía en el laboratorio de la Universidad del Azuay, el cual es un material con una pureza muy alta que se obtuvo en algunos depósitos del oriente ecuatoriano, de la formación Hollín, los cuales se encuentran localizados en el cantón Limón Indanza, provincia de Morona Santiago.

Con lo que respecta a la preparación de la muestra, se procedió a tamizar la muestra de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y de Magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), de la cual se obtuvo una mezcla homogénea con la finalidad de que el tamaño de las partículas que iban a ser utilizadas, cumplieran con las especificaciones requeridas para poder proceder con los demás métodos que se requerían posteriormente. De esta manera, el material silíceo estuvo comprendido por partículas en un rango que va entre 0.25 mm y 0.149 mm.

La fracción retenida entre las mallas N° 60 y la N° 100 son las que se utilizó para realizar el proceso de homogenización con el otro material, que en este caso la mezcla resultante fue de un 50% de sílice y 50% de magnetita en peso.

### **2.1.1. Determinación de densidades de las muestras**

Con una balanza de presión, se procedió a separar una determinada masa de cada una de las muestras y el volumen se determinó por el cambio del nivel del agua en una probeta al agregar el material.

Los pasos para determinar la densidad de cada material fueron los siguientes:

1. Se tomó una porción de material seco y se pesó 50 gramos de cada material.
2. Se utilizó una probeta graduada de 100 ml.
3. Se colocó los 50 gramos de material en la probeta junto con 50 ml de agua.
4. Se obtuvo el volumen final de cada material.

La densidad se define como la relación entre el peso (masa) de una sustancia y su volumen. Las unidades de masa más comúnmente utilizadas son  $\text{kg/m}^3$  o  $\text{g/cm}^3$  para sólidos y  $\text{kg/l}$  o  $\text{g/ml}$  para líquidos. Cuando se hace referencia a la densidad de una sustancia, su peso se describe en términos de su tamaño, para nuestra prueba se utilizó la masa del material seco y la diferencia del volumen que se evidencia en la probeta al agregar el material.

$$\delta = \frac{m}{v} \quad (19)$$

### Densidad de los materiales

#### Densidad de la Magnetita

Masa: 50 g.

Volumen: 10.5  $cm^3$ .

$$\delta = \frac{m}{v}$$

$$\delta = \frac{50 \text{ g}}{10 \text{ cm}^3}$$

$$\delta = 5 \text{ g/cm}^3$$

Se logró determinar una densidad de 5  $g/cm^3$  para el concentrado de magnetita, según la literatura (Noval, Ochoa, & Carriazo) la densidad del mineral de magnetita se ubica en 5.2  $g/cm^3$ . Se adjudica la variación de la densidad de nuestra muestra a que la concentración del mineral de magnetita no es del 100%, por lo que suponemos que la concentración de la muestra es de aproximadamente del 96%.

#### Densidad de la Sílice

Masa: 50 g.

Volumen: 19  $cm^3$ .

$$\delta = \frac{m}{v}$$

$$\delta = \frac{50 \text{ g}}{19 \text{ cm}^3}$$

$$\delta = 2.63 \text{ g/cm}^3$$

La densidad teórica de la Sílice es de  $2.65 \text{ g/cm}^3$ , la cual es muy próxima a la obtenida a través de nuestra prueba.

## 2.2. Diseño y construcción del concentrador tipo “Z”

Para el diseño de concentrador Z, se tomó como referencia los concentradores ampliamente utilizados en minería aluvial aurífera en las zonas de la Amazonía ecuatoriana, que constan de una estructura vertical de acero dentro de la cual se encuentran empotrados tres canalones fijos en zigzag, como se puede apreciar en la figura 2.2.



**Figura 2.2.** Concentrador Z.

**Fuente:** (Diario El universo, 2020)

La construcción del concentrador tipo Z a escala de laboratorio utilizó el mismo diseño que sus contrapartes utilizadas en explotación aluvial, pero se aplicó una modificación que permite variar el ángulo de inclinación en los canalones 2 y 3. Se detallara los planos elaborados para la construcción del concentrador.

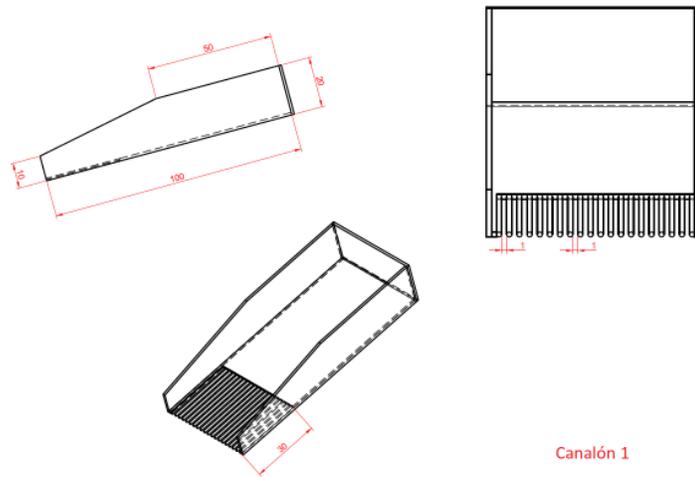


Figura 2.3. Canalón 1.

Fuente: Elaboración propia.

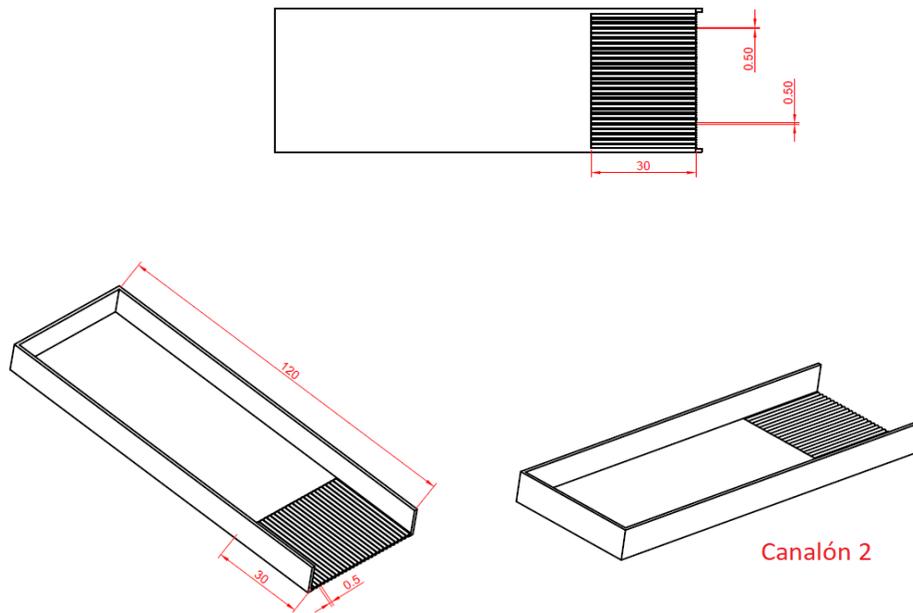
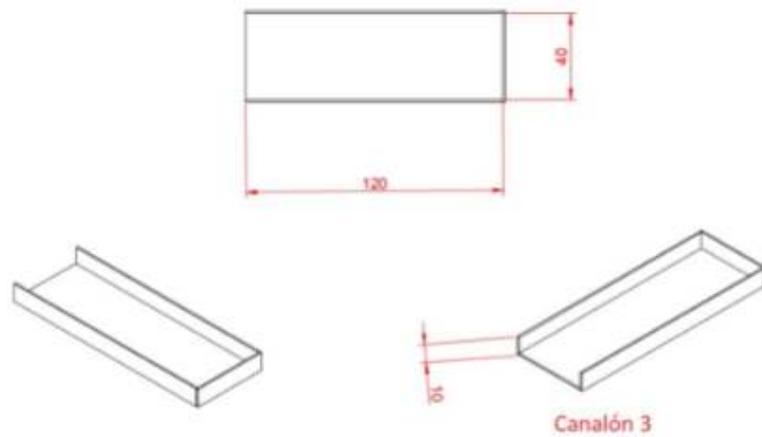


Figura 2.4. Canalón 2.

Fuente: Elaboración propia.

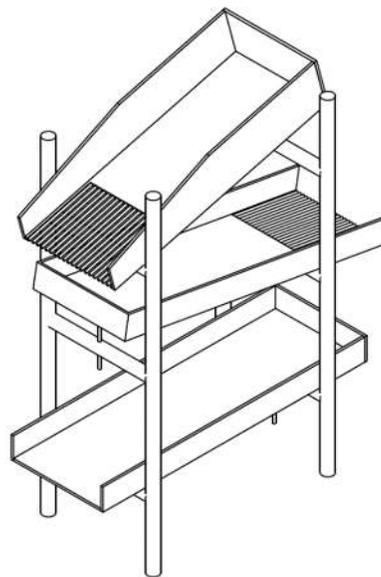
El tercer concentrador es similar al segundo con la diferencia de ser continuo sin la malla para separar los materiales.



**Figura 2.4.** Canalón 3.

**Fuente:** Elaboración propia.

El concentrador tipo Z a escala de laboratorio se aprecia en la figura 2.6.



**Figura 2.5.** Concentrador tipo Z.

**Fuente:** Elaboración propia.

La estructura metálica fue construida en tubos de acero galvanizado de 2 pulgadas de diámetro y fue soldado por expertos con suelda apta para que soporte cargas y compresiones. Mientras que los canalones, cuyas dimensiones se exponen en las figuras 2.4, 2.5 y 2.6, se forjaron de láminas de acero galvanizado de 3 mm de espesor.



**Figura 2.6.** Elaboración del concentrador tipo.

**Fuente:** Elaboración propia.

La disposición en la se instalaron cada uno de los canalones permite removerlos en caso de ser necesario para su traslado o para variar sus condiciones de operación, además de la variación de ángulo de operación que permiten los canalones 2 y 3.

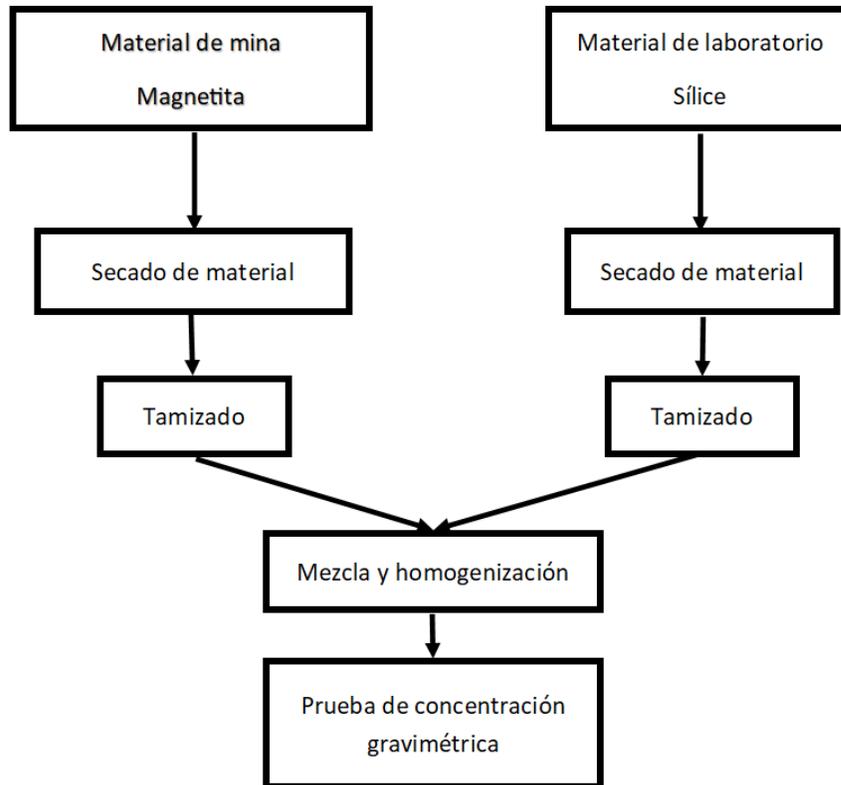
### **2.3. Dosificación de la muestra**

Los concentrados de cada material se dosificaron de tal manera que tanto la sílice y la magnetita tengan proporciones semejantes para que, al momento de realizar la mezcla el producto resultante de una proporción 50/50 en peso.

Esta dosificación nos ayuda a evaluar las muestras resultantes de cada uno de los ensayos, si la proporción de la muestra para cada ensayo es diferente de la proporción

inicial de 50/50 se logra demostrar que el equipo concentrador tipo Z es eficiente para una concentración gravimétrica y variando los ángulos de inclinación se determinan los parámetros operaciones que logren la mayor recuperación.

Si, al contrario, en el resultado de cada ensayo la proporción continúa siendo de 50/50 se dará por sentado que el equipo no es eficiente para concentración gravimétrica.



**Figura 2.7.** Preparación de muestras en laboratorio.

**Fuente:** Elaboración propia.

Luego de tamizar, se mezclaron 3 kg de magnetita de entre 0.25 y 0.149 mm con 3 kg de sílice del mismo rango de tamaños, se procedió a homogenizar la mezcla de ambos materiales y se obtuvo una masa resultante de 6 kg, los cuales serán los que se ingresen al sistema del concentrador tipo Z para cada uno de los ensayos.

### 2.3.1 Metodología del ensayo

La metodología utilizada para el desarrollo del presente estudio consiste en la elaboración de una escala guía de concentraciones, la cual servirá para determinar mediante una comparación con las muestras de los 5 ensayos a realizar en la concentradora tipo Z, el porcentaje de concentración de minerales de interés y de ganga.

Para la elaboración de la escala se realizó la mezcla de magnetita como concentrado y la sílice como ganga a diferentes concentraciones. Para ello, en cada mezcla se prepararon cantidades de concentrado y ganga de 10 en 10. Por ejemplo, tener 90% de magnetita con un 10% de sílice constituye una guía, además de una guía de 100% de sílice y una de magnetita obteniendo 11 guías distintas entre la mezcla de los minerales con fracciones conocidas. Estas guías permitieron cotejar la información en los resultados que obtenemos al variar los ángulos de inclinación de la máquina.

**Tabla 2.1** Ensayos a realizar

Escala de concentración		
N° de guía	% SiO <sub>2</sub>	% Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
1	100	0
2	90	10
3	80	20
4	70	30
5	60	40
6	50	50
7	40	60
8	30	70
9	20	80
10	10	90
11	0	100

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 2.8.** Escala de concentración  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_4$ .

**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura 2.9 se puede apreciar la escala de concentración Sílice/Magnetita, a la derecha la muestra con una concentración de 100% de magnetita, mientras que a la izquierda de la figura la muestra con concentración de 100% de Sílice.

#### **2.4. Determinación de parámetros operacionales**

Para determinar los parámetros operacionales se realizaron pruebas con el concentrador tipo Z se trabajó únicamente con la variable del ángulo del canalón, para esto se procedió a representar los ángulos en el costado de la misma máquina, esto nos facilitó al momento de hacer los ensayos de manera continua. Después se desarrollaron los ensayos con las muestras variando los ángulos de inclinación del canalón de  $3^\circ$  en  $3^\circ$  por cada ensayo y dándonos un total de cinco ensayos

El ángulo de los canalones es la variante que se aplicó al diseño del concentrador y corresponde al objetivo del presente trabajo, al analizar estas modificaciones se puede interpretar si existe una separación gravimétrica y cuál es la eficiencia de la misma, al obtener estos datos damos cumplimiento con el objetivo de la presente investigación sobre el concentrador tipo el concentrador tipo Z a escala de laboratorio,

#### **2.4.1 Caudal (Q)**

Se estima que el flujo de agua sea un aproximado del 25% de agua que entra en la pulpa (Sandra, 2017). Un criterio muy válido también es el presentado por (Maistri, 1993) donde sugiere que el agua debe cubrir homogéneamente toda la bandeja con una película de espesor variable en función del tamaño de las partículas en la alimentación.

En nuestros ensayos se verificó que el film de agua fuera de 5 mm sobre los riffles en donde se depositaba el material más denso. Es por esto se implantó una bomba de agua eléctrica de 1 HP para poder sedimentar las partículas que se extraerán del material de interés. Dicha bomba aportaba un flujo constante de 55L/min de agua.

El agua llegaba al primer canalón o también llamado tolva, en donde se mezclaba con el material y formaba una pulpa muy líquida que le permitía fluir hacia los otros canalones en donde los minerales densos se quedaban atrapados en los riffles, mientras que los minerales más livianos flotaban y se iban a las colas.

#### **2.5. Procesamiento de las muestras.**

La recolección de los distintos procesamientos se los detallará a continuación, se ha llevado un proceso ordenado con la finalidad de obtener una buena distribución que permita un trabajo ágil, continuo y garantizando resultados confiables.

Previo al proceso realizado a las muestras, se instauraron sus características físicas-mecánicas y se logró la homogenización de su granulometría mediante tamizado.

Se realizaron cinco ensayos como se puede evidenciar a continuación:

**Tabla 2.2.** Condiciones de los ensayos a realizar.

N° de ensayo	Ángulo (°)	Muestra (kg)	Flujo de Agua (l/s)
1	5	6	0.90
2	8	6	0.90
3	11	6	0.90
4	14	6	0.90
5	17	6	0.90

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla 2.1 podemos apreciar las condiciones de cada uno de los ensayos, especificando el ángulo de inclinación, la masa de la muestra que fue constante, al igual que el flujo de agua. Como se puede evidenciar la única variable que se tuvo en cuenta durante nuestros ensayos fue el ángulo de inclinación del canalón.

## **2.6 Procesamiento de resultados**

### **2.6.1 Recolección del concentrado.**

En primer lugar, se retiró el mineral de interés de la concentradora que existía en el segundo canalón en húmedo y todas las demás muestras se tomaron del mismo canalón. El concentrado se recogió con ayuda de una pala y se depositó en un recipiente, posterior a ello, el material fue extendido en una lona, para ser secado a temperatura ambiente y por último, se utilizó un horno de secado a una temperatura de 150 °C. Una vez secada la muestra se la introdujo en un frasco para analizar cada muestra obtenida en los ensayos. Después las muestras en los frascos fueron marcadas mediante una codificación según el número de ensayo y el ángulo de inclinación que fue utilizado.

### **2.6.2 Recolección del relave o colas.**

El relave fue almacenado en una tina plástica que fue instalada en la parte inferior del canalón número 3 la cual fue la encargada de recoger las colas y posteriormente con una pala se depositó el material en un recipiente y posteriormente fue secado en un horno a una temperatura de 150 °C.

Los productos finales ya obtenidos tanto del concentrado como de los relaves que se obtuvieron de las muestras tomadas de los ensayos del concentrador tipo Z fueron comparados con la escala de guías elaborada con anterioridad para determinar la concentración de minerales de las muestras de cada ensayo. Los resultados de los ensayos se detallarán en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

#### 3.1 Resultados de los ensayos

Se efectuaron cinco ensayos en el concentrador tipo Z en los cuales se tomó registro de la masa en la alimentación que en todos los ensayos será la misma tanto en concentración como en masa, el ángulo de inclinación del canalón y una muestra representativa del concentrado y del relave de cada ensayo.

Posteriormente estas muestras fueron sometidas a una comparación cualitativa con la escala de concentraciones construida con anterioridad, para determinar con una apreciación visual las concentraciones de magnetita y sílice arrojadas por cada uno de los ensayos.



**Figura 3.1.** Desarrollo de ensayo 1.

**Fuente:** Elaboración propia.

1. El primer ensayo se ejecutó en un ángulo de  $5^\circ$  y con 6 kg de material que fue agregado en la parte superior del concentrador de manera moderada mientras se inyectaba un flujo de agua con un caudal de agua de 0.90 l/s que caía en el canalón, ayudando a que el mineral se disperse mientras el agua lavaba al mineral menos denso, realizando la separación por la diferencia de densidades.

En la figura 3.2 podemos ver las muestras resultantes del primer ensayo, el frasco con codificación R1P1 corresponde a la muestra tomada de las colas producidas por el ensayo 1, mientras que el frasco C1P1 es la muestra del concentrado depositado en el canalón, en base a una comparación visual con la escala guía de concentración se establece que R1P1 contiene un 40% de magnetita, mientras que C1P1 contiene un 60% de magnetita.



**Figura 3.2.** Resultado ensayo 1

**Fuente:** Elaboración propia.

2. El segundo ensayo se realizó con un ángulo de  $8^\circ$  con los mismos 6 kg de material depositados desde la parte superior y con un flujo constante de agua de en 0.90 l/s. En la figura 3.3 el frasco R2P2 que corresponde a las colas contiene un 30% de magnetita y el C2P2 contiene un 70% de magnetita.



**Figura 3.3.** Resultados ensayo 2.

**Fuente:** Elaboración propia.

3. Lo que concierne al tercer ensayo se realizó con un ángulo de  $11^\circ$  cumpliendo con los mismos requerimientos del flujo de agua de 0.90 l/s. En la figura 3.4 el frasco R3P3 correspondiente a las colas contiene un 25% de magnetita, mientras que el C3P3 contiene un 75% de magnetita.



**Figura 1.4.** Resultados ensayo 3.

**Fuente:** Elaboración propia.

4. El penúltimo ensayo se realizó con la variación del ángulo de  $14^\circ$  siguiendo con el flujo de agua constante de 0.90 l/s. En la figura 3.5 el frasco R4P4 que recoge muestra de las colas contiene un 20% de magnetita, mientras que el C4P4 correspondiente al concentrado contiene un 80% de magnetita.



**Figura 3.5.** Resultados ensayo 4.

**Fuente:** Elaboración propia.

5. El último ensayo se la concluyo con el ángulo de  $17^\circ$  alimentando al canalón desde la parte superior del canalón con la misma muestra de 6 kg de material manteniendo el flujo de agua en los mismos 0.90 l/s. En la figura 3.6 el frasco C5P5 correspondiente al concentrado contiene un 90% de magnetita, mientras que el R5P5 contiene un 10% de magnetita.



**Figura 3.6.** Resultados ensayo 5.

**Fuente:** Elaboración propia.

### Tabla de resultados

**Tabla 3.1.** Resultados de concentración.

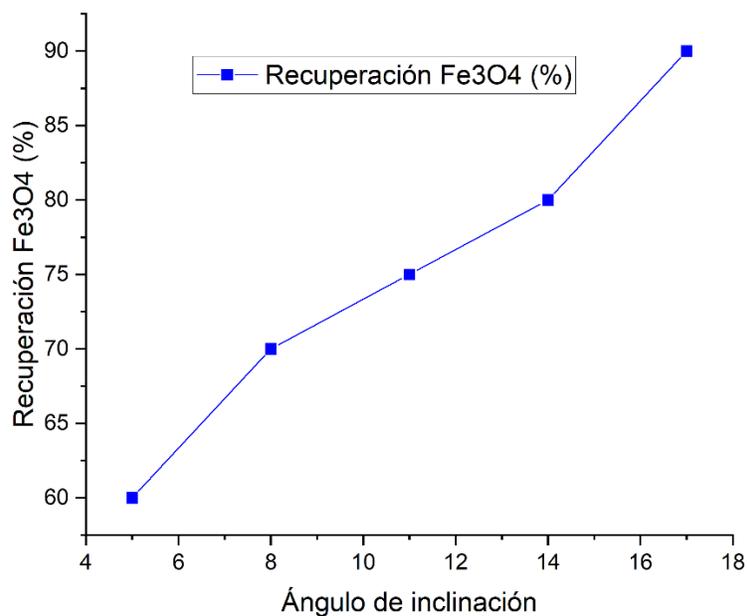
Resultados de concentración gravimétrica en concentrador tipo Z					
Ensayo	Peso (kg)	Ángulo de inclinación (°)	Recuperación Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (%)	Recuperación SiO <sub>2</sub> (%)	Peso (%)
1	6	5	60	40	100
2	6	8	70	30	100
3	6	11	75	25	100
4	6	14	80	20	100
5	6	17	90	10	100

**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.2 Interpretación de los resultados

Se obtuvieron resultados favorables desde la instalación del equipo hasta la culminación de los ensayos realizados. Al variar los ángulos de inclinación después de finalizar cada ensayo se evidenció que mientras más inclinación se presentaba en el canalón nos arrojaba mejores resultados en la concentración por lo que se puede deducir que el objetivo de verificar si en el concentrador tipo Z a escala de laboratorio es posible concentrar minerales se ha cumplido puesto que se ha logrado concentrar magnetita, además de lograr una concentración máxima del 90% lo que refiere que el equipo es factible y rentable para su uso en concentración gravimétrica de minerales.

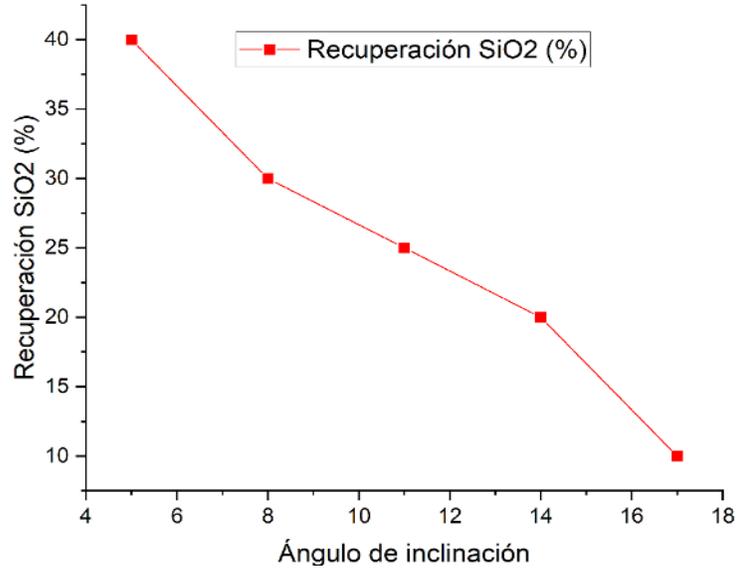
Con lo que respecta a los ensayos la recuperación fue de manera ascendente, desde el primer hasta el último ensayo ya que se logró concentrar el mineral de interés en una forma ascendente en un 60%, 70%, 75%, 80% y 90%.



**Figura 3.7** Gráfica de Puntos de Magnetita

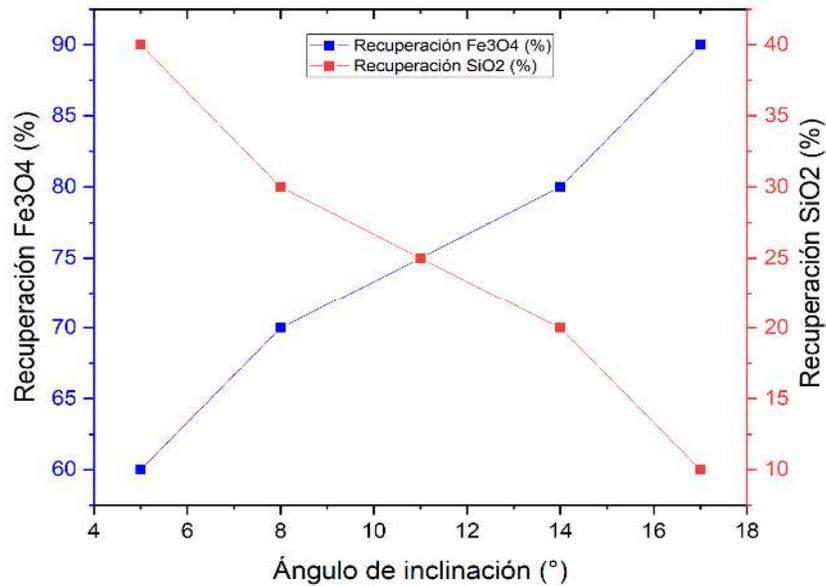
**Fuente:** Elaboración propia.

En la gráfica 3.7 se puede evidenciar que con un ángulo de 17° se logró una recuperación del 90% de mineral de magnetita y se evidencia que esta concentración tiende al alza.



**Figura 3.8.** Gráfica de concentraciones de Sílice.

**Fuente:** Elaboración propia.



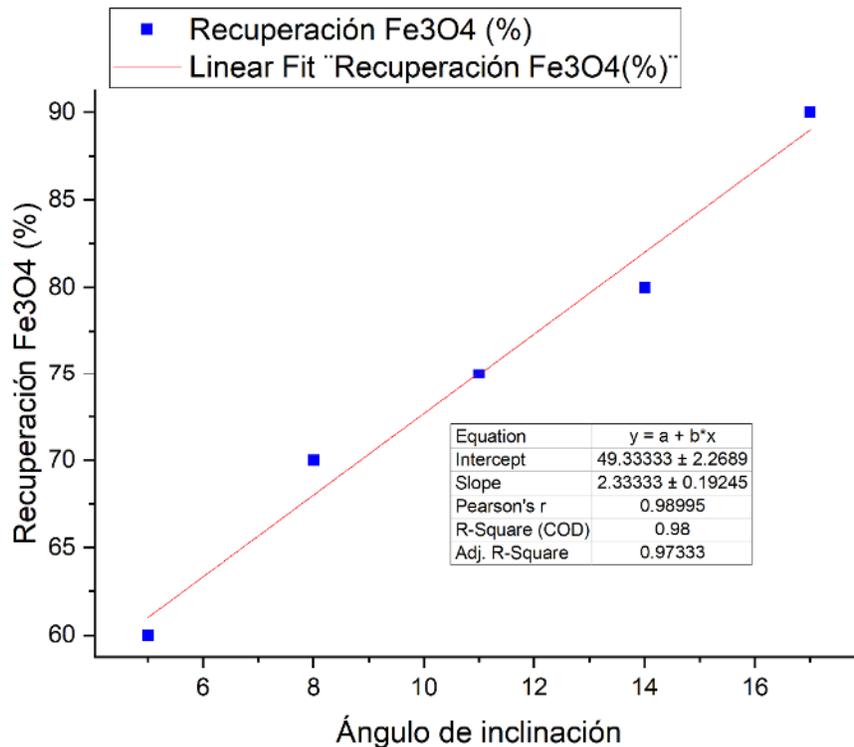
**Figura 3.9.** Concentraciones de magnetita y sílice.

**Fuente:** Elaboración propia.

Cuanto más constante sea el flujo de descarga en el concentrador tipo “Z”, mayor será la tasa de recuperación de material. En contraste con un caudal menor al necesario se comienzan a depositar los minerales menos densos y con un caudal mayor se pierde mineral de interés en las colas. Por lo que controlar y mantener una alimentación constante fue crucial para el correcto desarrollo de los ensayos.

### 3.3 Análisis y comparación de los resultados.

Con los datos obtenidos en los ensayos se puede evidenciar una correlación lineal entre la concentración de mineral de magnetita y el ángulo de inclinación del canalón; por lo tanto, al realizar una regresión lineal podemos determinar la ecuación de la recta de concentración de magnetita.



**Figura 3.10.** Ecuación de regresión lineal.

**Fuente:** Elaboración propia.

La ecuación  $y = 2.3333x + 49.333$  representa la eficiencia del concentrador tipo “Z” en función del ángulo de inclinación del canalón y arroja valores que pueden ser interpretados y utilizados para anticiparse a futuros ensayos con ángulos diferentes.

Los resultados que se obtuvieron fueron clasificados e etiquetados para conllevar un buen orden al momento de compararlos con la tabla 2.1 antes realizada. El análisis y la comparación se llevaron minuciosamente para no tener datos erróneos, al momento de cotejarlas ya que esto nos suponía la realización de ensayos nuevos alterando la muestra que ya estuvo preparada con anticipación.

En cuanto a la comparación de los resultados entre las muestras extraídas de cada ensayo y la escala grafica porcentual que se elaboró con anterioridad, nos arrojó resultados equivalentes y aproximados a los encontrados por (Sarabia, 2016) en su trabajo de titulación al igual a lo encontrado por (Feijoo & Acosta, 2020) en su artículo de investigación sobre concentración gravimétrica en concentradores tipo Z, en las cuales concuerdan con nuestros resultados a corroborar que el equipo es eficiente para una concentración gravimétrica.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- El ensayo obtenido en esta investigación ha permitido implementar un concentrador gravimétrico tipo “Z” en el laboratorio de la Universidad del Azuay el cual será un activo y servirá para futuras investigaciones o experimentos.
- En el concentrador tipo “Z” al emplear un doble sistema de canalones se proporcionará una concentración de hasta un 90% al realizarlo a escala de laboratorio y constituye un modelo compacto para su uso y transporte, coincidiendo con los resultados obtenidos por Natalia Ruiz en 2018.
- La facilidad de variación de ángulos y parámetros del concentrador a escala de laboratorio, permite su aplicación en un amplio rango de tamaños y una variedad de minerales de interés, demostrando así que la tesis planteada por Julián Yáñez en 2014 que refiere a la versatilidad del concentrador tipo Z.
- El concentrador tipo “Z” requiere una inversión inicial baja, sumado a esto que el mantenimiento requerido es mínimo y soporta largas jornadas de trabajo; coincidimos con Jimena Sarabia al afirmar que el proceso de concentración gravimétrica en un concentrador tipo “Z” es económico, simple y altamente rentable debido a sus altos índices de recuperación.
- Se logró determinar que la máxima eficiencia del concentrador tipo “Z” utilizando los canalones en un ángulo de  $17^\circ$  es del 90% y se logró cumplir el objetivo del presente trabajo, el cual era demostrar que el concentrador sí es efectivo para una separación gravimétrica. Se estima que la eficiencia del concentrador sube, cuando la diferencia de densidades entre los minerales sea mayor a la utilizada en el presente trabajo.
- La recuperación que se obtuvo de la magnetita es directamente proporcional a la inclinación de la canaleta ajustable del concentrado tipo Z. La concentración

de sílice que se obtuvo es inversamente proporcional al ángulo de inclinación con el que trabaja el canalón.

- Se determinó que el comportamiento del índice de recuperación de magnetita utilizando el concentrador Z se ve expresado por la siguiente ecuación lineal  $y = 2.3333x + 49.333$ , en la cual está supeditada al ángulo de inclinación del canalón.

## Recomendaciones

Para realizar el trabajo de titulación es importante determinar las variables que se utilizaran en el proceso de concentración por gravimetría y mantener un análisis de los materiales por sus principales características.

Es de suma importancia tener en cuenta algunas recomendaciones antes de realizar la práctica:

- El concentrador Z utiliza el principio de funcionamiento de los canalones, teniendo en cuenta el ancho que está relacionado con la cantidad de agua suministrada; el material de sujeción debe ser una alfombra o una banda con riffles en los cuales se depositen los minerales densos y dependerá de las características del mineral a concentrar al igual que los ángulos de los canalones.
- Es recomendable que la granulometría del material no sea mayor a diez veces la apertura de la primera criba o canalón, pues podría generar una acumulación de materiales y un cribado ineficiente.
- En lo posible sería de emplear ciclos cortos, puesto que el depósito donde se recolectan los relaves se satura de agua y tiende a derramarse.
- La manera de evitar el desperdicio de agua es, utilizar la bomba de presión con la que cuenta el equipo para reciclar el agua del relave, esto siempre y cuando las características del agua de relave así lo permitan.
- Se debe comprobar las condiciones de operación como es el caudal, la cantidad de alimentación e inclinación de los canalones, para que se adapten a las características de cada material a procesar.
- Al momento de terminar un ciclo de procesamiento es recomendable extraer todas las alfombras o riffles y hacer circular agua para remover todo el material que pudiera estar retenido en las cribas y secciones de los canalones, esperando tener la mínima pérdida posible de mineral.
- Si se va a recircular el agua utilizada, se debe tomar en cuenta que se va a

necesitar más tiempo para permitir que sedimenten las partículas finas, preferiblemente en una piscina o en un depósito amplio en el cual luego se pueda retirar el material fino sedimentado.

- Se recomienda que al realizar ensayos con materiales de diferentes características y que contengan minerales diferentes a los utilizados en el presente trabajo, se vuelvan a determinar los parámetros operativos óptimos máximos para dichos materiales y permitan obtener mejores resultados en la recuperación.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Fiallos, F., & Feijoo Loayza, C. (18 de diciembre de 2020). Recuperación de Oro Mediante Concentración Gravimétrica Utilizando Concentradores Tipo Z En El Distrito Minero Zamora-Ecuador. *Investigación y Desarrollo FIGEMPA*, 43.
- Balsea, V. (2018). ENSAYOS DE RECUPERACIÓN GRAVIMÉTRICA: MUESTRA HG-EC. SECTOR sAN JORGE-NAPO, ECUADOR.
- Barsky, G., Swainson, S., & Hedley, N. (1934). Disolución de oro y plata en soluciones cianuradas. *Trans. AIME* 112, 677.
- Bouchard, S. (2001). *Traitement du minerai : flottation, méthodes physiques*. Sainte-Foy, Québec: Le Griffon d'argile.
- Burt, D. (1984). Paragenesis, crystallochemical characteristics, and geochemical evolution in micas in granite pegmatites. *in Mineralogy, Vol. 13, Min. Soc. America*, 257-297.
- Bustamante, O., Gaviria, A., & Restrepo, O. (2008). Concentración de Minerales. En O. Bustamante, A. Gaviria, & O. Restrepo. Medellín.
- Castillo Migone, J. (2014). Programa Integral Concentración de Minerales. Lima, Perú: Tecsup.
- Cristhian, F. L., & Fausto, A. F. (2020). recuperación de oro mediante concentración gravimétrica utilizando concentradores tipo z en el distrito minero zamora-ecuador. *FIGEMPA*, 1-8.
- Gaudin, A. (1939). *Principles of Mineral Dressing*. New York.
- Houot, R., J. R., Yong, S., & Baeza, R. (1995). Houot, R., Joussemet, R., Yong, S. and Baeza, R. (1995) Beneficiation of Talc Products. 1st UBC-McGill Bi-Annual International Symposium of Fundamentals in Mineral Processing, Vancouver, BC, Canada, 20-24 August 1995, 378-384. En *Beneficiation of Talc Products* (págs. 378-384). Vancouver, Canada.

- López Valdivieso, A., Ibarra Amaya, A., Oliva Rangel, S., & Reyes Bahena, J. (23 de Octubre de 1999). CONCENTRACION GRAVIMETRICA CENTRIFUGA DE ORO Y PLATA. SU IMPLEMENTACION EN EL CIRCUITO DE MOLIENDA DE MINERA EL PILON. Acapulco.
- Maistri, A. (1993). *Guía al Curso de Tratamiento de Minerales y a las prácticas de laboratorio*. . Cuenca : LIMUSA .
- Marsden, J., & House , I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction* . Colorado: Littleton.
- Martínez-Pagán, P. (Diciembre de 2011). *OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Cartagena*. Obtenido de [https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod\\_resource/content/1/Tema\\_8\\_-\\_Concentracion\\_por\\_Gravedad\\_I\\_-\\_Pulsadoras.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod_resource/content/1/Tema_8_-_Concentracion_por_Gravedad_I_-_Pulsadoras.pdf)
- Noval Lara, V. E., Ochoa Puentes, C., & Carriazo Baños, J. G. (s.f.). Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Revista Colombiana de Química*.
- Orellana, J. (2005). TRATAMIENTO DE LAS AGUAS. Ingeniería Sanitaria- UTN - FRRO.
- Ruiz Agudelo, N. (30 de Junio de 2018). LA IMPORTANCIA DEL DESARROLLO DE NUEVAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA LA. Bogotá, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- SARABIA PALACIOS, J. D. (2016). DISEÑO DE EXPLOTACIÓN DE LOS DEPÓSITOS AURÍFEROS ALUVIALES PROFUNDOS DEL RÍO JATUN YACU, ÁREA CONFLUENCIA, TENA. MACAS, Morona santiago, Ecuador : ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO.
- Taggart, A. F. (1996). *Elementos de preparación de minerales*. Madrid: Interciencia.
- Tupiza, J. (2019). Tecnologías limpias para el aprovechamiento de depósitos detríticos (oro aluvial) ubicados en la Provincia del Napo. En *Trabajo de titulación*

*previo a la obtención del Título de Ingeniero en Minas* (págs. 32-33). Quito: Quito: UCE.

Villas, R., & Sanchez, M. (2006). *Tecnologías limpias en las industrias extractivas minero-metalúrgicas y petrolera*. Bolivia: 2nd ed.Santa Cruz de la Sierra.

Yáñez Montaña, J. C. (2014). *PLAN DE MANEJO AMBIENTAL PARA LA EXPLOTACION ALUVIAL DE ORO Y PLATINO EN EL MUNICIPIO DE CONDOTO CHOCO*. Bogota: Universidad Militar Nueva Granada .

**ANEXOS**



**Anexo 1.** Lugar de extracción del mineral ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )

**Fuente:** Elaboración propia.



**Anexo 2.** Secado el mineral de Magnetita.

**Fuente:** Elaboración propia.



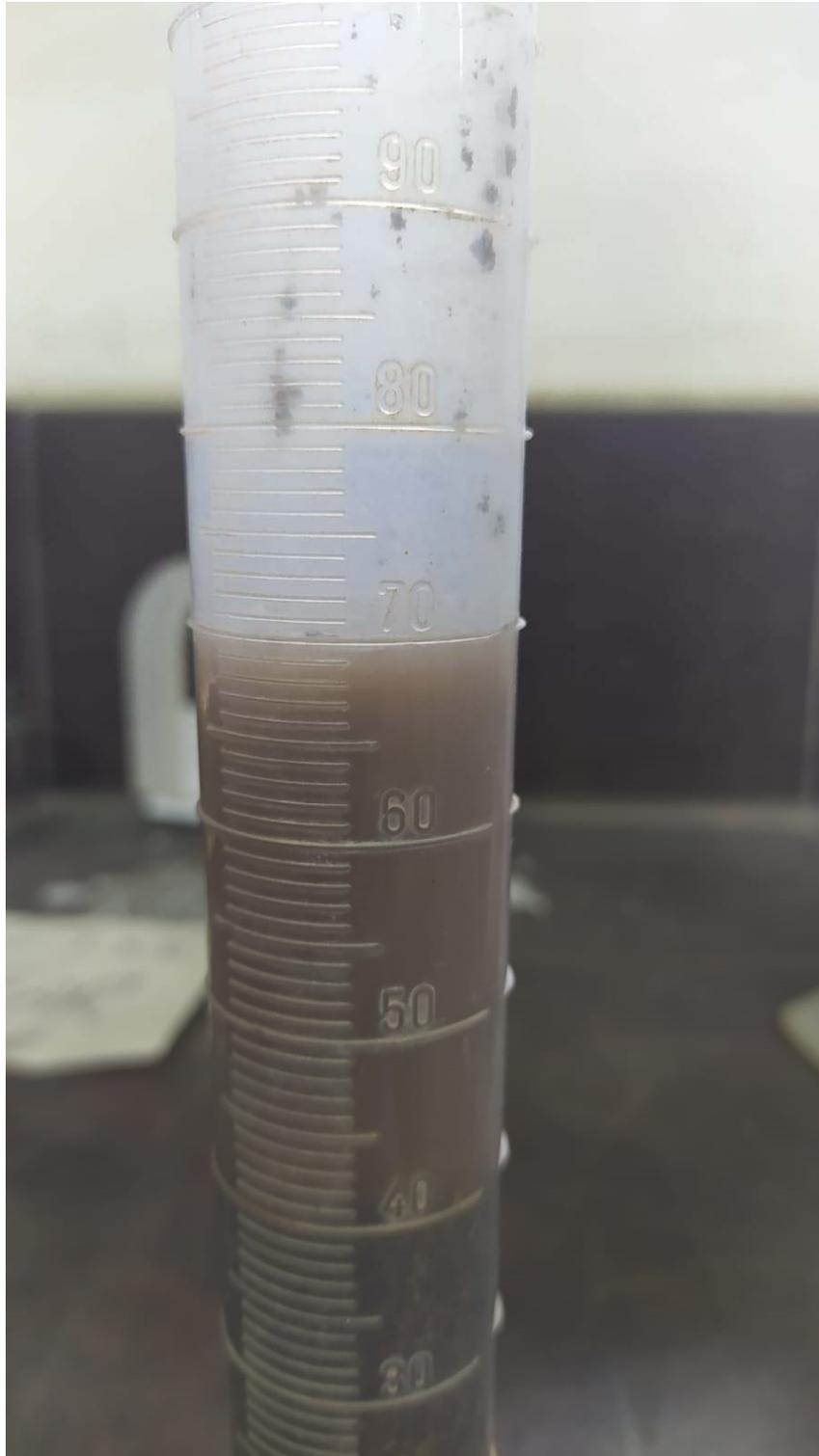
Anexo 3. Tamizado del material denso.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 4. Tamizado del material liviano.

Fuente: Elaboración propia.



**Anexo 5.** Determinación de densidades.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Anexo 6.** Material para la construcción del equipo.

**Fuente:** Elaboración propia.



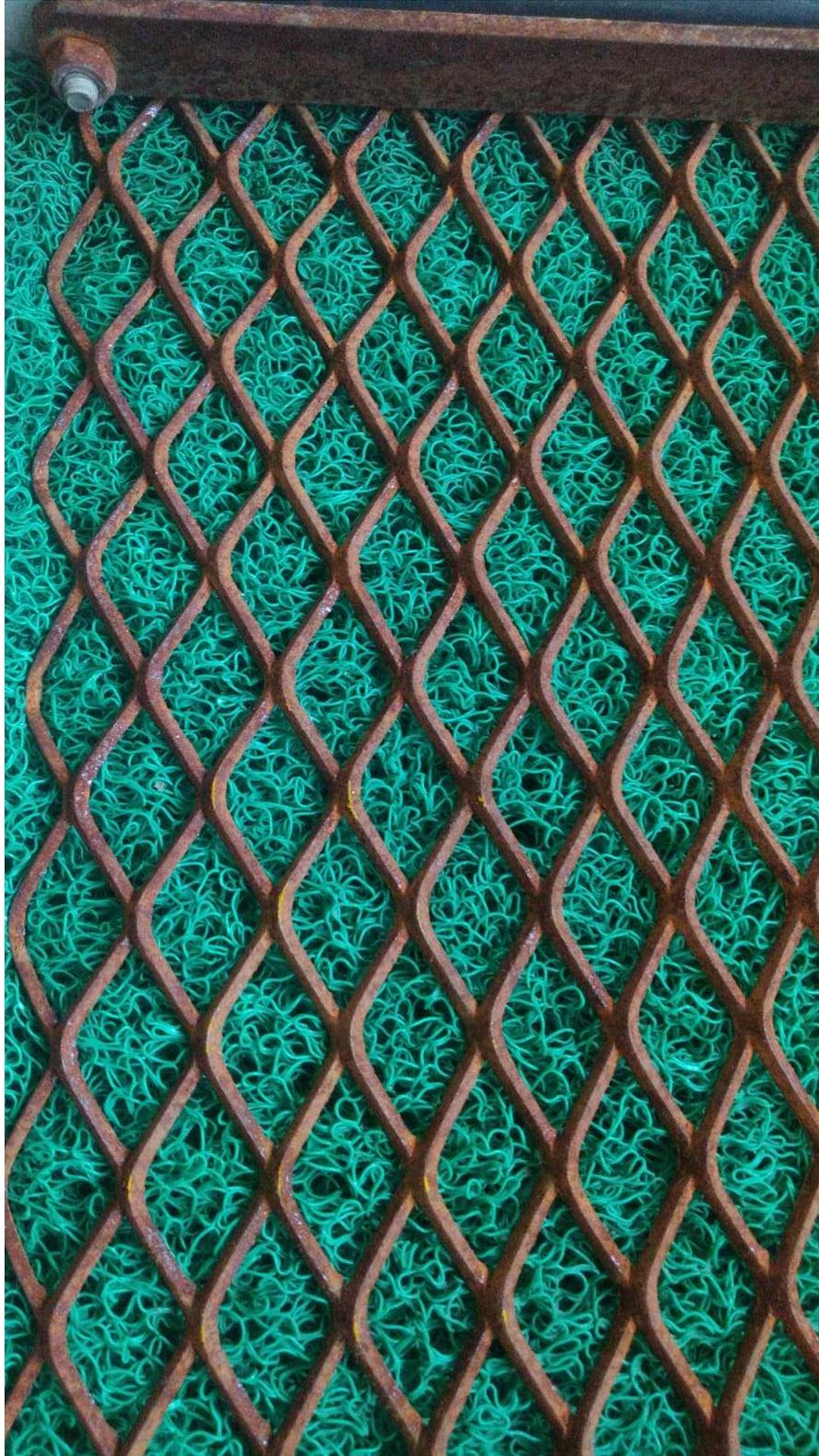
**Anexo 7.** Construcción del equipo.

**Fuente:** Elaboración propia.



Anexo 8. Instalación de bomba de agua.

Fuente: Elaboración propia.



**Anexo 9.** Sistema de rifles alternativo (no utilizado).

**Fuente:** Elaboración propia.



Anexo 10. Prueba de funcionamiento.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 11. Desarrollo de ensayos.

Fuente: Elaboración propia.



Anexo 12. Recolección y cuarteo de concentrados.

Fuente: Elaboración propia.



**Anexo 13.** Interpretación de resultados del ensayo 1.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Anexo 14.** Interpretación de resultado del ensayo 2.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Anexo 15.** Interpretación de resultados del ensayo 3.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Anexo 16.** Interpretación de resultados ensayo 4.

**Fuente:** Elaboración propia.



**Anexo 17.** Interpretación de resultados ensayo 5.

**Fuente:** Elaboración propia.