



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

“Análisis de alternativas para la concentración gravimétrica de Cu y Ag en relaves de
flotación”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autores:

Brito Quezada Christian René
Fajardo Llivicura Cristian Ronaldo

Director:

Fernando Tulio Valencia Guaricela

CUENCA, ECUADOR

2019

AGRADECIMIENTO

“El hombre siempre debe encontrar el tiempo para agradecer a las personas que marcan la diferencia en la vida. Siempre hay tiempo para hacerlo, se lo hace en cualquier momento”.

Agradezco de manera muy especial a mis padres Saúl y Luz por permitirme y apoyarme en la ardua tarea que es ser un estudiante universitario y acompañarme en todas las etapas de mi vida; en especial ésta, en la que llegaré a ser un profesional y será el inicio para una nueva etapa de mi vida.

También agradezco a mis hermanos y familiares por el apoyo diario recibido, los buenos consejos, el cariño y el afecto, la generosidad y la bondad.

A los profesores por ser un apoyo para forjar el aprendizaje, por los consejos y la paciencia, por su ardua labor.

Estoy Infinitamente Agradecido.

GRACIAS

Christian Brito.

Agradezco a mis padres Carlos e Hilda y a mi abuelita Margarita ya que ellos son el pilar fundamental en la formación de mi persona, por los valores, consejos y principios que me han inculcado.

A mi familia por el apoyo incondicional, en especial a mi hermana Carla por su confianza, generosidad y su incansable ayuda en cada momento.

Finalmente quiero agradecer a todo el personal docente de la carrera de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay por impartir sus conocimientos y formar parte de otro objetivo alcanzado.

Cristian Fajardo

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTO	II
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	III
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VIII
ÍNDICE DE ANEXOS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Índices metalúrgicos.....	4
1.1.1. Clasificación de los Índices Metalúrgicos.....	4
1.1.2. Índices que Relacionan Calidad	4
1.1.2.1. Recuperación (R)	4
1.1.2.2. Razón de enriquecimiento (R_E).....	5
1.1.2.3. Índice de Selectividad (I.S.).....	5
1.1.3. Índices que Relacionan Capacidad.....	5
1.1.3.1. Razón de concentración (RC)	5
1.1.3.2. Rendimiento de Concentración (V)	6
1.1.3.3. Eficiencia de la Separación (E).....	6
1.2. Concentración gravimétrica	7
1.2.1. Principio de la concentración gravimétrica.....	8
1.2.2. Criterio de concentración	8
1.2.3. Requerimientos de Operación	12
1.2.4. Efecto del tamaño de la partícula	13
1.2.5. Fundamentos de la separación sólido - sólido	13
1.2.6. Clasificación de los métodos gravimétricos.....	14
1.2.6.1. Métodos de concentración en medio denso:	14
1.2.6.2. Métodos de concentración en corrientes	17

1.2.7. Equipos Concentradores	20
1.2.7.1. Jigs	20
1.2.7.1.1. Tipos de Jigs.....	20
1.2.7.2. Mesa vibradora.....	21
1.2.7.2.1. Funcionamiento.....	21
1.2.7.2.2. Características operacionales	23
1.2.7.2.3. Variables de operación de las mesas vibratorias.....	23
1.2.7.2.4. Mecanismos de separación de la mesa vibratoria	24
1.2.7.2.5. Características de la concentración en mesas concentradoras	25
1.2.7.2.6. Ventajas.....	26
1.2.7.2.7. Desventajas	26
1.2.7.3. Espiral	27
1.2.7.3.1. Funcionamiento.....	27
1.2.7.3.2. Parámetros de operación	29
1.2.7.3.3. Clasificación de espirales.....	30
1.2.7.3.4. Características de las espirales	30
1.2.7.3.5. Aplicaciones.....	32
1.2.7.3.6. Ventajas.....	33
1.2.7.3.7. Desventajas	33
1.3. Relaves mineros	34
1.3.1. Depósitos de relaves.....	34
1.3.2. Principales problemas	35
1.3.3. Tipos de depósitos de relaves.....	35
1.3.4. Relaves: De Residuos a Recursos	36
ESTADO DEL ARTE.....	37
CAPÍTULO II	39
2. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO.....	39
2.1. Descripción del Experimento.....	39
2.2. Ubicación e información de la Planta de Relave	40
2.3. Trabajo de Campo: Muestreo.....	41
2.4. Preparación del Material	43
2.4.1. Secado	43

2.4.2.	Trituración.....	43
2.4.3.	Cuarteo y Homogenización.....	44
2.5.	Caracterización del Material	45
2.5.1.	Densidad del material.....	45
2.5.2.	Preparación de Pulpa.....	47
2.5.3.	Fracción de Sólidos ϕ_S	47
2.5.4.	Densidad de Pulpa δ_p	49
2.6.	Descripción del experimento en la Espiral Humphrey	50
2.6.1.	Fracción de Sólidos	50
2.6.2.	Caudal de alimento.....	51
2.7.	Experimento en Espiral Humphrey	52
2.7.1.	Proceso	52
2.8.	Descripción del experimento en la Mesa Vibratoria.....	59
2.8.1.	Fracción de Sólidos	59
2.8.2.	Caudal de alimento.....	59
2.8.3.	Caudal de Lavado.....	60
2.8.4.	Inclinación Horizontal.....	60
2.9.	Experimento en Mesa Vibratoria	60
2.9.1.	Proceso	60
CAPITULO III.....		67
3.	RESULTADOS.....	67
3.1.	Espiral Humphrey	67
3.1.1.	Ag.....	67
3.1.2.	Cu	68
3.1.3.	Análisis de Recuperaciones por Equipo de Cu y Ag	69
3.2.	Mesa Vibratoria.....	71
3.2.1.	Ag.....	71
3.2.2.	Cu	72
3.2.3.	Análisis de Recuperaciones por Equipo de Cu y Ag	73
3.3.	Análisis de Resultados de la clasificación gravimétrica por equipos	74
3.4.	Flujograma	75

3.5. Análisis de Resultados de los Flujogramas de concentración gravimétrica	81
CONCLUSIONES.....	82
RECOMENDACIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	86
ANEXOS	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Caudal de alimento en espiral Humphrey	51
Tabla 2.2 Caudal de experimento en espiral Humphrey	51
Tabla 2.3 Interacción de variables del experimento en espiral Humphrey	52
Tabla 2.4 Interacción de las variable y número de ensayo en espiral Humphrey	53
Tabla 2.5 Promedio del concentrado en la espiral Humphrey	55
Tabla 2.6 Factor de Concentración en la espiral Humphrey	56
Tabla 2.7 Recuperación y Factor de Enriquecimiento de la Plata (Ag) en Espiral Humphrey.....	57
Tabla 2.8 Recuperación y Factor de Enriquecimiento de la Cobre (Cu) en Espiral Humphrey.....	58
Tabla 2.9 Interacción de variables del experimento en la mesa vibratoria	60
Tabla 2.10 Interacción de las variable y número de ensayo en la mesa vibratoria...	61
Tabla 2.11 Promedio del Concentrado en la mesa vibratoria	63
Tabla 2.12 Factor de Concentración en la mesa vibratoria.....	64
Tabla 2.13 Recuperación y Razón de Enriquecimiento de la Plata (Ag) en la Mesa Vibratoria.	65
Tabla 2.14 Recuperación y Razón de Enriquecimiento del Cobre (Cu) en Mesa Vibratoria	66
Tabla 3.1 Recuperación metalúrgica de Ag en espiral Humphrey.....	67
Tabla 3.2 Recuperación metalúrgica de Cu en espiral Humphrey.....	68
Tabla 3.3 Recuperación metalúrgica de Cu y Ag en espiral Humphrey	69
Tabla 3.4 Recuperación metalúrgica de Ag en la mesa vibratoria.....	71
Tabla 3.5 Recuperación metalúrgica de Cu en la mesa vibratoria.....	72
Tabla 3.6 Recuperación metalúrgica de Cu y Ag en la mesa vibratoria	73
Tabla 3.7 Experimentos con mayor recuperación metalúrgica.....	75
Tabla 3.8 Recuperaciones de los Flujogramas.....	81

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1.1 Relación de diámetros para el criterio de concentración(CC).....	11
Figura 1.2 Representación sistemática del separador en medio denso del tipo tambor	15
Figura 1.3 Representación sistemática del separador en medio denso: Dyna Whirloop y el ciclón de medio denso.	16
Figura 1.4 Características de los métodos de separación por corriente.	17
Figura 1.5 JIG de tipo HARZ	18
Figura 1.6 Mesa Deister.	18
Figura 1.7 Sección transversal de un concentrador Knelson de 3 pulgadas, y características de su operación.	19
Figura 1.8 Mesa vibratoria tipo Deister	22
Figura 1.9 Movimiento de partículas y acción de rifles en una mesa concentradora	22
Figura 1.10 Estratificación vertical de las partículas entre los “rifles”	24
Figura 1.11 Movimiento de las partículas en una mesa vibratoria parcialmente“riffleada” y una mesa vibratoria totalmente “riffleada”.	25
Figura 1.12 Sección transversal de la artesa de una espiral y distribución de las partículas sobre ella.	28
Figura 1.13 Sección transversal de un espiral mostrando la posición de las bandas densa intermedia y ligera.	28
Figura 1.14 Modelo de espirales	29
Figura 1.15 Flow sheet de concentración gravitacional utilizando espirales en tres etapas.....	32
Figura 1.16 Tranque de relaves	34
Figura 1.17 Deposito de relaves mineros	34
Figura 1.18 Aprovechamiento de relaves.....	36
Figura 1.19 Diagrama de la central	36
Figura 2.1 Dirección de la empresa Excelmoro S.A.....	40
Figura 2.2 Material de relave	41
Figura 2.3 Análisis de laboratorio.....	42
Figura 2.4 Trituradora de rodillos	43
Figura 2.5 Homogenización y cuarteo de material	44
Figura 3.1 Histograma de Recuperación de Ag en Espiral Humphrey	68

Figura 3.2 Histograma de Recuperación de Cu en Espiral Humphrey	69
Figura 3.3 Histograma de Comparación de Recuperaciones de Plata (Ag) y Cobre (Cu) en Espiral Humphrey.	70
Figura 3.4 Histograma de Recuperación de Ag en Mesa Vibratoria	71
Figura 3.5 Histograma de Recuperación de Cu en Mesa Vibratoria.....	72
Figura 3.6 Histograma de Comparación de Recuperaciones de Plata (Ag) y Cobre (Cu) en Mesa Vibratoria.	73
Figura 3.7 Recuperación gravimétrica por equipos	74
Figura 3.8 Flujograma 1	78
Figura 3.9 Flujograma 2	78
Figura 3.10 Flujograma 3	79
Figura 3.11 Flujograma 4	79
Figura 3.12 Flujograma 5	80
Figura 3.13 Flujograma 6	80

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Análisis de laboratorio de Au, Ag y Cu del Concentrado final de la mesa vibratoria y del espiral Humphrey.....	88
Anexo 2 Análisis de laboratorio de Au, Ag, Cu, Pb, Zn y Fe del relave de alimento.	88
Anexo 3 Espiral Humphrey de la Universidad del Azuay	89
Anexo 4 Mesa vibratoria de la Universidad del Azuay	90

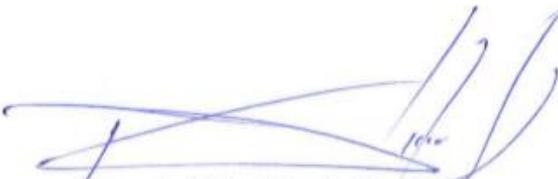
RESUMEN

Se realizó la concentración gravimétrica en la espiral y en la mesa vibradora debido a que los relaves aún contienen una significativa cantidad de mineral de sulfuros de cobre y plata con ley de 0.11 % y de 6.10 gr/ton respectivamente.

Se efectuó el proceso de concentración gravimétrica donde se varió ciertos parámetros operacionales: en la mesa el ángulo transversal cambió de 1 a 3° con una variación por unidad y con dos caudales de agua de lavado; en la espiral se trabajó con 2 diferentes pulpas de 10 y 15% de fracción de sólidos con 3 caudales de ingreso.

En la espiral Humphrey se obtuvo una recuperación promedio de Cu y Ag de 20.4 %; en el caso de la clasificación en la mesa vibratoria se alcanzó una recuperación media de 21.4% de Cu y Ag.

Palabras clave: Concentración gravimétrica, espiral Humphrey, mesa vibratoria.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Director del Trabajo de Titulación



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Coordinador de Escuela



Christian René Brito Quezada
Autor

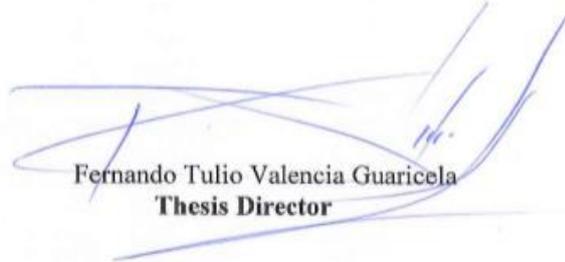


Cristian Ronaldo Fajardo Llivicura
Autor

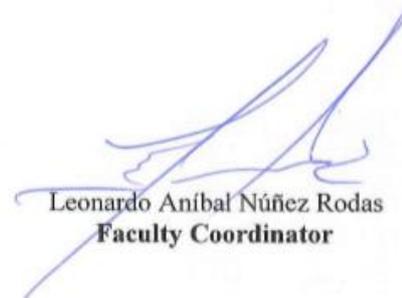
ABSTRACT

The gravimetric concentration in spiral and vibrating table were performed because the tailings still contained a significant amount of copper and silver sulphide ore with a grade of 0.11% and 6.10 gr/ton, respectively. The gravimetric concentration process was carried out and certain operational parameters were varied. The transverse angle on the table changed from 1° to 3° with a variation per unit and with two flows of washing water, 2 different pulps of 10% and 15% of solids fraction were used in the spiral with 3 flow rates. An average recovery of Cu and Ag of 20.4% was obtained in the Humphrey spiral. An average recovery of 21.4% of Cu and Ag was achieved in the case of the classification in the vibrating table.

Keywords: Gravimetric concentration, Humphrey spiral, vibrating table.



Fernando Tulio Valencia Guaricela
Thesis Director



Leonardo Aníbal Núñez Rodas
Faculty Coordinator



Christian René Brito Quezada
Author



Cristian Ronaldo Fajardo Llivicura
Author



Translated by
Ing. Paúl Arpi

Brito Quezada Christian René
Fajardo Llivicura Cristian Ronaldo
Trabajo de Titulación
Ing. Fernando Valencia, M.Sc.
Octubre 2019

CAPÍTULO I

“Análisis de alternativas para la concentración gravimétrica de Cu y Ag en relaves de flotación”

INTRODUCCIÓN

La minería en el Ecuador está en vías de desarrollo especialmente la tecnología minera y por el momento sus procesos son un tanto ineficientes o no cuentan con el rendimiento adecuado presentando una pérdida de minerales en sus procesos de recuperación y tratamiento, dichos metales suelen llegar a los relaves los que generalmente no son recuperados, únicamente almacenados y dispuestos ahí por todo el resto de la vida de la mina. Nuestra minería tiene a la flotación como uno de los procesos más utilizados para la concentración de minerales de interés, pues, es un proceso amigable con el ambiente, de bajo costo y que genera buenos resultados; pero en sí la recuperación de minerales no es lo suficientemente alta en este proceso por lo que siempre existe material de interés en los relaves, ya sea por ser un proceso inadecuado, algún fallo humano en la flotación o por las características mismas del material que no permiten una recuperación total o un porcentaje de recuperación más alto de los minerales de interés como son Cu y Ag.

Los relaves mineros son considerados pasivos ambientales de gran potencial contaminante por su capacidad de generar drenaje ácido de mina, contaminación por metales al suelo y agua y además un problema social y económico ya que se da una pérdida de recursos para los mineros al tener mineral de interés y no poderlo aprovechar. Los relaves tienen un alto contenido de metales pesados, materiales químicos tóxicos y gran cantidad de roca triturada de pequeño tamaño que puede causar gran daño al ambiente al ponerse en contacto con este, dentro del relave también

tenemos minerales de interés económico en bajas concentraciones, pero contenido en un gran volumen de relave; por lo que se puede concentrar los minerales al aumentar su contenido o ley y reduciendo el volumen que lo contiene.

Este proyecto de tesis consiste en recuperar los minerales de interés existentes en los relaves de flotación aprovechando la diferencia de densidades mediante una concentración gravimétrica al pasar el material por la mesa vibratoria y la espiral, calibrando los equipos al trabajar con las variables operacionales para ir mejorando el proceso y obtener un concentrado con un alto grado de recuperación mineralógica. Lo que se pretende es ver las diferencias en el concentrado de ambos equipos, la recuperación, y si el proceso de concentración gravimétrica mejoraría al crear sistemas de concentración buscando aumentar la recuperación global del proceso, es decir crear varios flujogramas para conocer el desempeño de los equipos. En resumen, el experimento tiene como objetivo principal el determinar la viabilidad técnica de concentración gravimétrica de Cu y Ag en relaves de flotación mediante la realización de los objetivos específicos los cuáles son: la caracterización mineralógica de los relaves mineros, la determinación de las condiciones de operación para una concentración gravimétrica de los relaves y el análisis de las posibles alternativas para el tratamiento de relaves mediante la creación de flujogramas para una concentración gravimétrica.

Dichos equipos por utilizar para la concentración presentan las ventajas de bajo costo de operación, no se necesita mano de obra calificada y el costo de adquisición o de construcción es accesible para los mineros del Ecuador. Además, los equipos utilizados pasarían a ser una alternativa para el tratamiento de relaves al conseguir buenos resultados en la concentración, ya que estaríamos generando un proceso viable de recuperación de minerales del relave y marcando la vía de entrada para el tratamiento de relaves al aprovecharlos y reducirlos.

JUSTIFICACIÓN

El análisis de alternativas para la concentración gravimétrica de Cu y Ag en relaves de flotación pretende determinar la viabilidad de un proceso de recuperación de minerales de interés a partir de los desechos mineros, debido a que uno de los principales problemas que enfrenta el aprovechamiento mineral es el alto contenido de material de interés económico en los relaves producto de la ineficiente recuperación en las plantas concentradoras. La importancia del desarrollo de este proceso para la minería en el mundo y principalmente en el Ecuador yace en una innovación tecnológica que los ingenieros en minas buscan para el tratamiento de los relaves, teniendo en cuenta la composición mineral que presentan dichos desechos y bajo la premisa que elementos de diferente densidad tienden a separarse por procesos gravimétricos, pues, actualmente en nuestro país únicamente estos desechos son almacenados en relaveras durante toda la vida útil de la mina convirtiéndose en un pasivo ambiental con un alto potencial de contaminación. Lo que se busca es dar solución a los grandes problemas ambientales ocasionados por los desechos mineros al recuperar el valor económico de los mismos, reducir su volumen y su potencial impacto ambiental.

En el proyecto en particular esperamos una recuperación superior al 50% del material de interés al concentrarlo por una mesa vibratoria y la espiral Humphrey conociendo los parámetros operacionales de los que depende cada equipo y modificando algunos de ellos para determinar los aspectos que representan un proceso óptimo de concentración.

MARCO TEÓRICO

1.

1.1. Índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos son números adimensionales que precisan la calidad de la separación efectuada en una o varias etapas de concentración, y además proporcionan información para el escalamiento en el dimensionamiento de equipos y/o plantas de concentración. (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008)

Es necesario que la determinación de los índices este apoyada por un balance de masa en el proceso de separación, debido a que, si ello no se realiza previamente, el cálculo de los índices puede generar números absurdos o incoherentes y que desorienten las decisiones y el análisis de los circuitos de concentración.

1.1.1. Clasificación de los Índices Metalúrgicos

Los índices metalúrgicos los podemos dividir en dos tipos:

Índices que relacionan calidad de la concentración e índices que relacionan capacidad del circuito de concentración, principalmente para usos de escalamiento. (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008)

1.1.2. Índices que Relacionan Calidad

Estos son los que proporcionan información acerca de la calidad de los productos obtenidos, bien sea en la etapa de concentración o globalmente en la planta. (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008)

1.1.2.1. Recuperación (R)

Se define la recuperación como la relación que existe en una operación de concentración entre el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que hay en la alimentación, o que ingresó a la operación. (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008)

$$R = \frac{\text{Peso del mineral de interés en concentrado}}{\text{Peso de mineral de interés en alimento}}$$

1.1.2.2. Razón de enriquecimiento (R_E)

Se define este índice 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 (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008), entonces:

$$R_E = \frac{t_c}{t_a}$$

1.1.2.3. Índice de Selectividad (I.S.)

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

$$I.S. = \frac{t_a(A)t_t(B)}{t_a(B)t_t(A)}$$

Dónde:

$t_a(A)$ y $t_a(B)$ son los tenores de los componentes (A) y (B) en la alimentación de la operación.

Los tenores $t_t(A)$ y $t_t(B)$ son de los componentes (A) y (B) en las colas respectivamente.

1.1.3. Índices que Relacionan Capacidad

Estos índices con la información necesaria para escalamiento, dimensionamiento y selección de equipos de concentración. (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008)

1.1.3.1. Razón de concentración (RC)

Se define como la razón entre el flujo másico de sólidos en la alimentación A con respecto al flujo de sólidos en el concentrado C. (Rúa, Gaviria, & Restrepo, 2008)

$$RC = \frac{A}{C}$$

1.1.3.2. Rendimiento de Concentración (V)

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

$$v = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC}$$

1.1.3.3. Eficiencia de la Separación (E)

Es un índice que combina la información obtenida en los anteriores numerales, el cual se define como:

$$E = \frac{R-V}{1-V_{ideal}}$$

1.2. Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es esencialmente un método para separar partículas minerales de diferente peso específico, por las diferencias en movimiento en respuesta a las acciones que ejercen sobre ellas simultáneamente la gravedad y/u otras fuerzas, como la hidráulica y de fricción. (Valdivieso, Amaya, & Rangel, 1999)

La concentración gravimétrica se puede emplear en etapas anteriores a la flotación para el beneficio económico de aquellos tamaños de mena, superiores a los manejables en flotación, que ya se encuentran liberados. (Almaguer, 2007)

La concentración gravimétrica no solo es usada para separar minerales o carbón de aquellos con los que se encuentran o presentan asociados. Es también común a muchos otros procesos industriales, tales como: separación de granos, pulpa de papel, y materiales químicos; reciclamiento de desperdicios municipales; recuperación y reciclamiento de derrames (petróleo en aguas), espumas, fabricación y producción de metales, etc. (Almaguer, 2007)

Es el método más sencillo y económico de todos los métodos de concentración. Su aplicación se recomienda cuando sea practicable, porque permite la recuperación de minerales en tamaños tan gruesos como sea posible, reduciendo costos en trituración, molienda y concentración, y disminuyendo pérdidas en los finos que generalmente se forman en las operaciones de reducción de tamaños. (Valdivieso, Amaya, & Rangel, 1999)

En los últimos años, muchas compañías han retomado, los sistemas gravimétricos, debido fundamentalmente a los siguientes factores:

- 1.- El incremento en los costos de los reactivos de flotación.
- 2.- La relativa simplicidad de los procesos gravimétricos.
- 3.- El hecho de que producen poca contaminación ambiental.

1.2.1. Principio de la concentración gravimétrica

Los métodos de concentración gravimétrica se utilizan para la separación de minerales de diferentes densidades utilizando la fuerza de gravedad y, últimamente, las tecnologías modernas aprovechan también la fuerza centrífuga para la separación de los minerales. (Francisco, 2014)

- En este tipo de separación se generan dos o tres productos: el concentrado, las colas, y en algunos casos, un producto medio (“midding”).
- Para una separación efectiva en este tipo de concentración es fundamental que exista una marcada diferencia de densidad entre el mineral y la ganga. A partir del llamado criterio de concentración, se tendrá una idea sobre el tipo de separación posible. (Francisco, 2014)

1.2.2. Criterio de concentración

La efectividad de cualquier proceso de concentración se puede predecir usando el “Criterio de Concentración”, o Relación de Asentamiento Libre, la cual relaciona los diámetros de dos partículas de diferentes densidades, pero con la misma velocidad de asentamiento bajo condiciones Newtonianas. (Rodríguez, 2007)

La deducción del criterio de concentración está dada por la igualación de las velocidades terminales de dos partículas de diferentes diámetros en el mismo fluido, en las que estas velocidades se pueden determinar en función de las características físicas del sólido (densidad, tamaño), propiedades físicas del fluido (viscosidad, densidad) y de las fuerzas que actúan sobre las partículas. (Rodríguez, 2007)

- Fuerza de Gravedad (F_x)
- Fuerza de Flotación (F_b)
- Fuerza de Fricción (F_r)

Por tanto, la fuerza (F) que actúa sobre una partícula en un fluido es:

$$F = m \cdot (dV/dt) = F_x - F_b - F_r \quad (1)$$

Donde:

F_x : fuerza gravitacional = $m \cdot g$

F_b : Fuerza de flotación = $w \cdot g \cdot \rho_f / \rho_s$

F_r : Fuerza de fricción = $\rho_f \cdot V^2 \cdot A \cdot K / 2$

Si las partículas parten del reposo ($V=0$) y si se tienen partículas esféricas ($A=\pi d^2 /4$), la ecuación 1 se convierte en:

$$V^2 = \frac{4gd(\rho_s - \rho_f)}{3K\rho_s} \quad \text{Ecuación de Newton para partículas gruesas (d > 1mm)} \quad (2)$$

$$V = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} \quad \text{Ecuación de Stokes para partículas finas (d < 1mm)} \quad (3)$$

Donde:

m : masa del sólido

g : aceleración de la gravedad

w : masa del fluido

ρ_f : densidad del fluido

V : velocidad Terminal de la partícula

A : área

K : coeficiente de rozamiento

d : diámetro de partícula

μ : viscosidad del fluido

Al igualar las velocidades terminales de dos partículas, una pesada y la otra liviana según la ecuación de Stokes y para flujo turbulento se tiene:

V_p : velocidad Terminal de la partícula pesada

V_l : velocidad Terminal de la partícula liviana

$$V_p = V_l$$

$$\frac{gdp(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} = \frac{gdl(\rho_l - \rho_f)}{18\mu}$$

$$CC \approx \frac{dl}{dp} = \frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad (4)$$

Es decir, si se tienen dos partículas una pesada y la otra liviana de densidades ρ_p y ρ_l , asentándose a la misma velocidad en un medio de densidad ρ_f , el diámetro de la partícula más liviana (d_l) es mayor que el diámetro de la partícula más pesada (d_p) (ver figura 1.1).

A nivel práctico, para que exista una separación eficiente el valor de CC debe ser mayor o igual a 2.5, para valores menores que 2.5, la eficiencia es relativamente pobre. (Rodríguez, 2007)

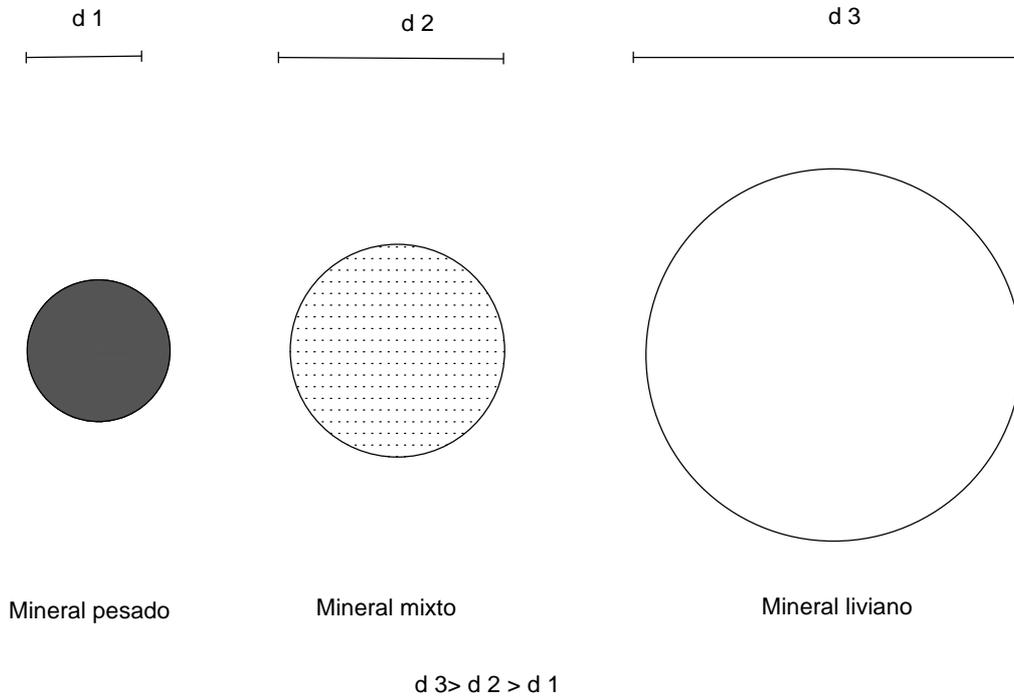


Figura 1.1 Relación de diámetros para el criterio de concentración (CC)

Fuente: (Rodríguez, 2007)

1.2.3. Requerimientos de Operación

Para que se produzca una buena concentración del mineral debe tenerse en cuenta (Rodríguez, 2007):

a) Liberación de las partículas: como el mineral rico se encuentra unido con la ganga en grandes tamaños, debe haberse sometido a un óptimo tratamiento de trituración y molienda, para asegurar la liberación de las partículas de interés, este grado de liberación de las partículas es determinado por medio de microscopios electrónicos. (Rodríguez, 2007)

b) Distribución de tamaños de partícula en el alimento: se debe tratar de no tener una distribución granulométrica muy amplia. (Rodríguez, 2007)

c) Forma de las partículas: las partículas según su forma se comportan hidrodinámicamente diferente, aunque sean de igual densidad, lo ideal es que fueran todas esféricas. (Rodríguez, 2007)

d) Diferencia de densidad: la diferencia de densidades debe ser notoria para que exista una buena separación, de acuerdo con el Criterio de Concentración (CC). (Rodríguez, 2007)

e) Disponibilidad de agua: generalmente la concentración gravitacional se efectúa en medio acuoso, es importante disponer de cantidad suficiente en el sitio donde se encuentre la planta de beneficio. (Rodríguez, 2007)

1.2.4. Efecto del tamaño de la partícula

El movimiento de una partícula dentro de un fluido depende no solamente de su densidad relativa, sino también de su tamaño, así, las partículas grandes serán más afectadas que las pequeñas. (Francisco, 2014)

La eficiencia de los procesos de separación gravimétrica, por lo tanto, aumenta con el tamaño de las partículas. Las partículas pequeñas en las cuales su movimiento es dominado principalmente por la fricción superficial, responden relativamente mal a los métodos de concentración gravimétrica. Sin embargo, los avances conseguidos en los últimos años en nuevos diseños de equipos (concentradores centrífugos), los cuales aprovechan la fuerza centrífuga para la separación del concentrado y las colas, han permitido el tratamiento de partículas finas con una considerable eficiencia. (Francisco, 2014)

En la práctica, es necesario un estrecho control del tamaño de la alimentación a los equipos gravimétricos, para reducir el efecto del tamaño y hacer que el movimiento relativo de las partículas dependa de la densidad de ellas. (Francisco, 2014)

1.2.5. Fundamentos de la separación sólido - sólido

Una separación física divide una corriente de partículas en dos o más corrientes: una conteniendo un concentrado del constituyente deseado y otra conteniendo un material deficiente, en base a sus diferentes propiedades físicas. Las propiedades físicas de los materiales que se pueden usar para llevar a cabo la separación pueden ser el tamaño de partícula, densidad relativa, forma, magnetismo, carga superficial, color, emisiones características, resistencia y fuerza. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

1.2.6. Clasificación de los métodos gravimétricos

Los métodos gravimétricos se pueden dividir en los siguientes tipos:

1.2.6.1. Métodos de concentración en medio denso:

En estos métodos el medio en el cual se produce la separación tiene una densidad intermedia con respecto a las densidades de las especies que se quieren separar. Existen dos tipos de separador en medio denso: estático y dinámico. (VILLCAPOMA JUAO & CHAVEZ POMA, 2012)

El líquido ideal para utilizar como medio denso es aquel que tiene las siguientes propiedades: barato, miscible en agua, estable, no tóxico, no corrosivo, de baja viscosidad y que tenga densidad ajustable en un gran intervalo.

Tres tipos de medios densos son usados comercialmente: líquidos orgánicos, sales disueltas en agua y suspensiones de sólidos de granulometría fina en agua.

Líquidos orgánicos

Estos líquidos tienen baja viscosidad, son estables y prácticamente inmiscibles en agua. Su aplicación industrial es limitada debido a que se descomponen químicamente, son tóxicos, corrosivos y de costo elevado. Los líquidos más usados son: yoduro de metileno; tetrabromoetano; bromoformo. (Pavez, 2008)

Suspensiones de sólidos

Son los líquidos densos más utilizados en la industria. Se definen como líquidos en los cuales sólidos insolubles se dispersan manteniendo sus características de fluidez. El agua se utiliza como el líquido de las suspensiones (Pavez, 2008).

Los factores principales que se consideran en la elección del sólido para las suspensiones son los siguientes:

- a) dureza alta
- b) peso específico alto
- c) estable químicamente, resistente a la corrosión
- d) sedimentación lenta y viscosidad adecuada
- e) distribución granulométrica, tamaño y forma de las partículas.

Los materiales normalmente usados para las suspensiones son: arcillas, cuarzo, barita, magnetita, galena, hierro-siliciomolido o atomizado y plomo atomizado. (Pavez, 2008)

Recuperación del medio denso

Los materiales usados en las suspensiones por su apreciable valor y por el alto costo de su preparación deben ser recuperados para su reutilización. (Prado, 2017)

Algunas aplicaciones de los medios densos son las siguientes:

- Producción de un concentrado final: carbón y algunos minerales industriales.
- Preconcentración: diamante, sulfuros y óxidos metálicos.

Equipos de separación estática: Separadores en medio denso del tipo tambor (Figura 1.2), separadores de conos, separadores en estanques y vasos. (Prado, 2017)

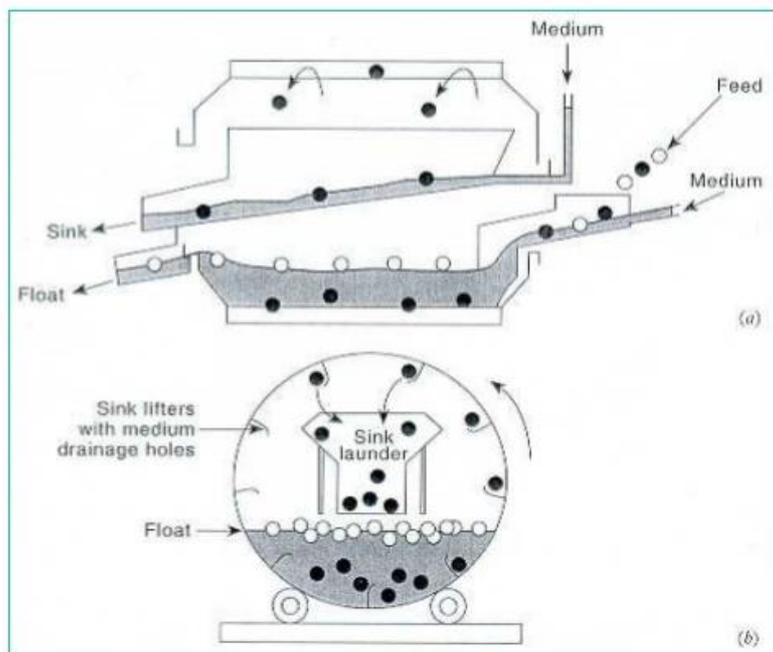


Figura 1.2 Representación sistemática del separador en medio denso del tipo tambor

Fuente: (Prado, 2017)

Equipos de separación dinámica

Ciclones de medio denso (Figura 1.3), separadores Vorsyl, separador Dyna- Whirpool.
(Prado, 2017)

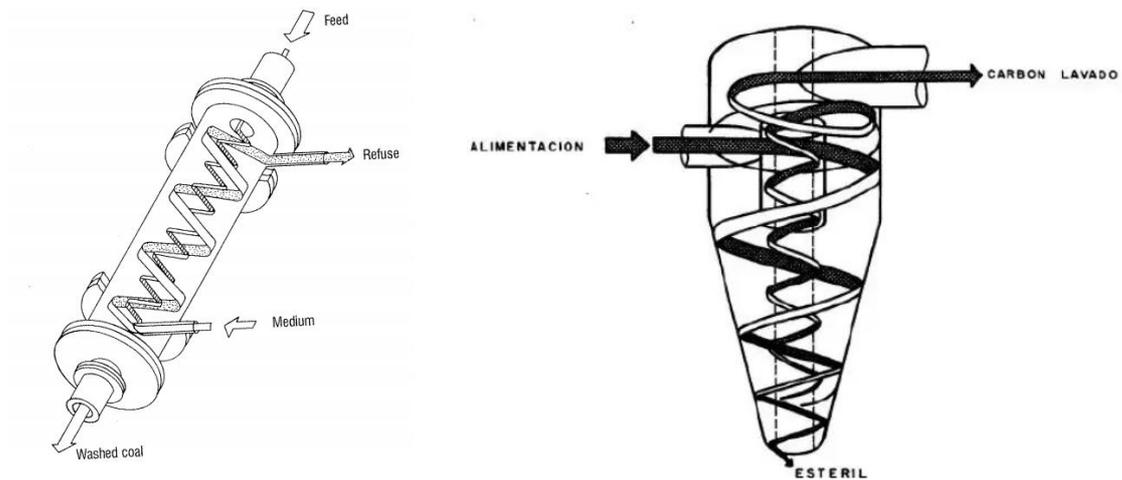


Figura 1.3 Representación sistemática del separador en medio denso: Dyna Whirloop y el ciclón de medio denso.

Fuente: (Pavez, 2008)

1.2.6.2. Métodos de concentración en corrientes

En estos métodos la densidad del medio es inferior a las densidades de las especies que se quieren separar. Existen diferentes tipos de separación en corrientes: corrientes verticales; corrientes longitudinales (escurrimiento laminar y escurrimiento en canaletas); corrientes oscilatorias; y corrientes centrífugas. (VIILCAPOMA JUAO & CHAVEZ POMA, 2012)

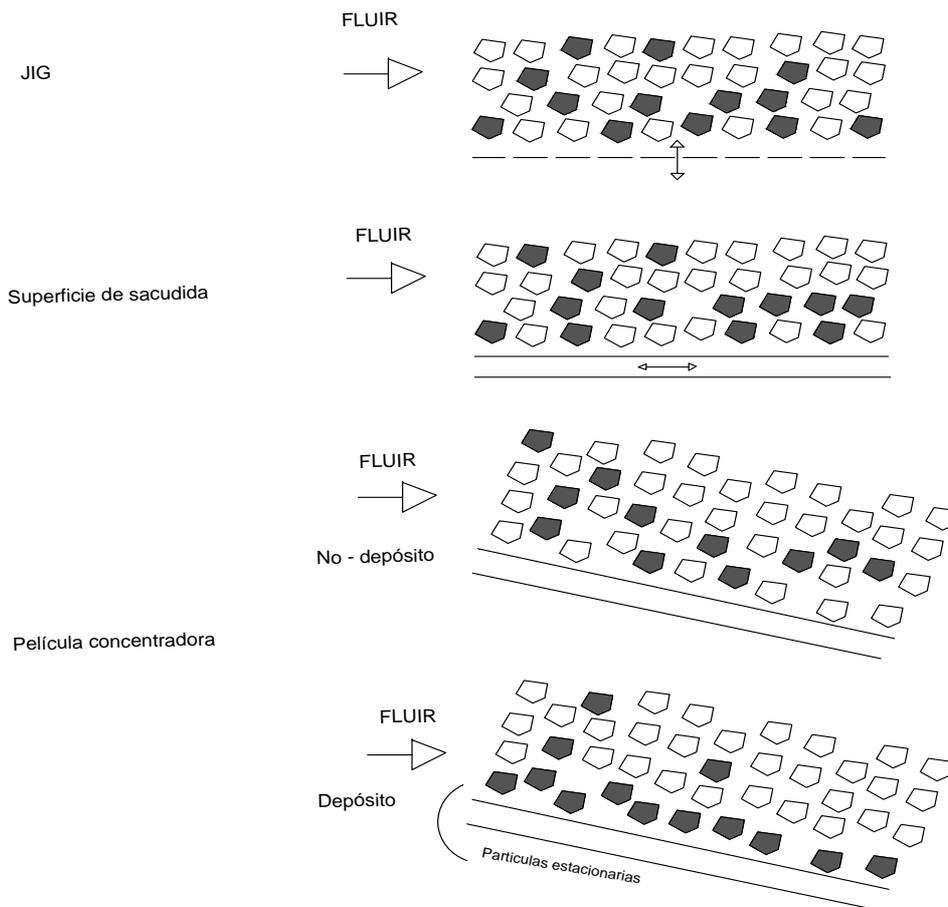


Figura 1.4 Características de los métodos de separación por corriente.

Fuente: (VIILCAPOMA JUAO & CHAVEZ POMA, 2012)

Equipos de separación en corrientes:

Corrientes verticales: JIGS (Figura 1.5).

Corrientes longitudinales: Mesas vibratorias, espirales, vanners, canaletas (Figura 1.6).

Corrientes oscilatorias: Mesas concentradoras oscilatorias.

Corrientes centrífugas: Concentradoras KNELSON.

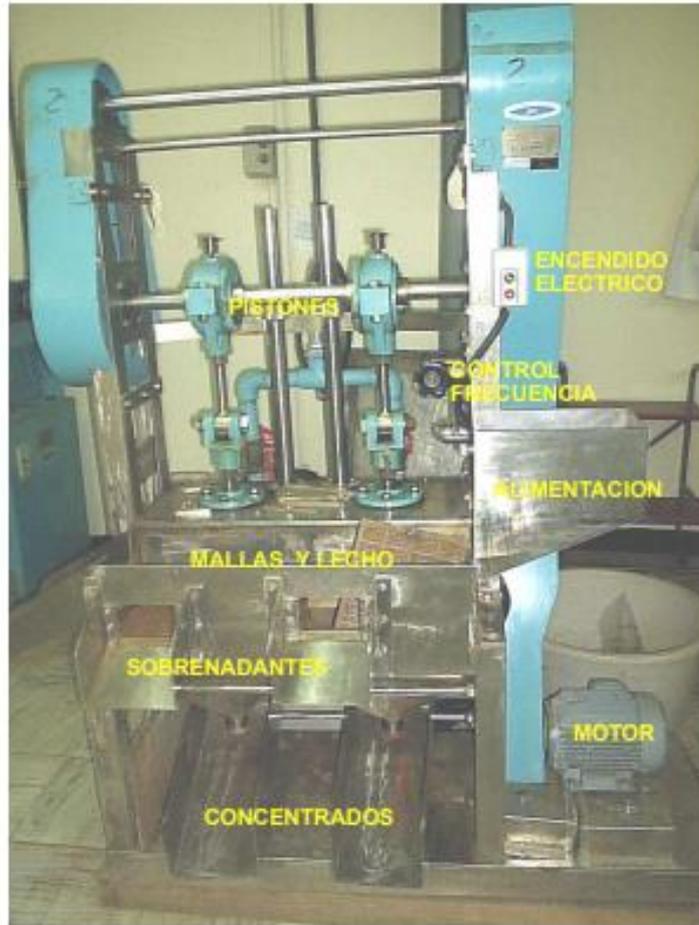


Figura 1.5 JIG de tipo HARZ.

Fuente: (Asanza & Merizalde, 2016)



Figura 1.6 Mesa Deister.

Fuente: (Rodriguez, 2007)

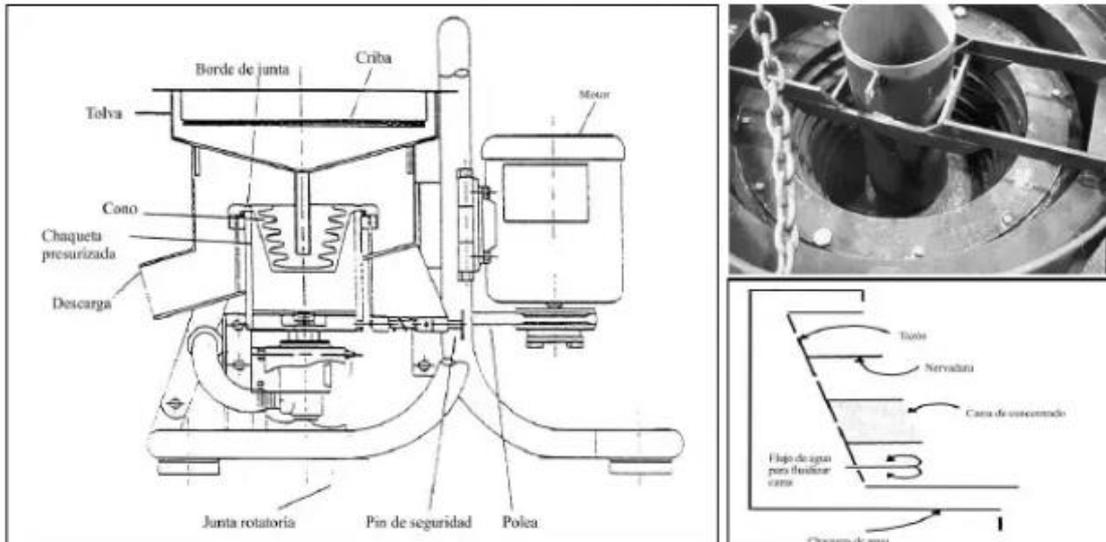


Figura 1.7 Sección transversal de un concentrador Knelson de 3 pulgadas, y características de su operación.

Fuente: (Almaguer, 2007)

Separación en corrientes verticales

A pesar de que en estos métodos también están presentes las fuerzas de separación de corrientes longitudinales, los efectos causados por las corrientes verticales les confieren características propias y por eso son estudiados en forma separada. (Francisco, 2014)

El equipo que utiliza corrientes verticales para la concentración de minerales es el jigs, en los cuales las corrientes verticales son generadas por el movimiento de pulsaciones en el agua. (Francisco, 2014)

A lo largo de la historia del procesamiento de minerales, se han desarrollado numerosos equipos para llevar a cabo la separación de los minerales por gravedad (Richard, Taggart, etc.). Sin embargo, actualmente solo un grupo de dichos equipos ha permanecido en activo en detrimento de los otros.

A causa de que los separadores gravimétricos son muy sensibles al contenido de lamas o material arcilloso, pues aumentan la viscosidad del medio; se tendra a eliminar previamente estos tamaños ($10 \mu\text{m}$) por medio de clasificadores hidráulicos o hidrociclones. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

En el caso de los jigs las corrientes verticales son generadas por el movimiento de pulsación del agua, al contrario de los elutriadores donde la corriente vertical se genera por una inyección de agua. (Pavez, 2008)

1.2.7. Equipos Concentradores

1.2.7.1. Jigs

La operación de pulsado o "jigging" es uno de los métodos más antiguos de la concentración gravimétrica. Esta técnica se emplea de forma satisfactoria para separar minerales adecuadamente liberados y que tienen unos tamaños relativamente gruesos, de 3 - 10 mm. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

Según Gaudin, tres son los efectos principales que contribuyen a la estratificación en los jigs:

- a) Clasificación por caída retardada.
- b) Aceleración diferencial en el inicio de la caída.
- c) Consolidación intersticial al final de la caída

1.2.7.1.1. Tipos de Jigs

Los jigs de parrilla fija se pueden dividir en:

a) Jigs de pistón

En los cuales el movimiento de pulsación es producido por un pistón ubicado en un estanque de agua. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

b) Jigs de diafragma

En los cuales las pulsaciones son producidas por movimientos alternados de una pared elástica del propio estanque. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

c) Jigs pulsadores

En los cuales las pulsaciones son producidas por chorros discontinuos periódicos del agua y del aire. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

1.2.7.2. Mesa vibradora

Las mesas concentradoras de movimiento longitudinal vibratorio son aparatos para concentración gravimétrica por flujo laminar sobre una superficie inclinada. (Arturo, 2007)

1.2.7.2.1. Funcionamiento

Las partículas de mineral se separan formando cejas o bandas en abanico, según el peso específico y granulometría al realizar el ajuste correspondiente. La mesa de movimiento longitudinal vibratorio está muy difundida principalmente en la minería del estaño, wolframio y oro hasta un máximo de 1,5 toneladas / hora por unidad. Permiten una amplia variación en sus parámetros operativos; pueden adaptarse al material de alimentación en la práctica. Como el proceso de concentración se realiza sobre la mesa, cualquier modificación cambia el comportamiento del material, que puede visualizarse inmediatamente; es posible tomar muestras en batea directamente. La optimización de esta operación es simple y puede ser realizada por aprendices. (Arturo, 2007)

La mesa Wilfley fue lanzada en 1895 y se constituyó en el principal modelo de mesa vibratoria. Después de constatarse su eficiencia su uso se propagó y surgieron nuevos modelos. La principal modificación de la mesa Wilfley fue el cubrimiento parcial del tablero con rifles paralelos al eje longitudinal, lo que permitió el tratamiento de alimentación gruesa y aumentó su capacidad. La mesa Wilfley dispone de un mecanismo que proporciona un movimiento de vibración lateral diferenciado en sentido transversal del flujo de la pulpa, que causa el desplazamiento de las partículas a lo largo de los rifles. (Vera & Barreto, 2017)

El ángulo de la mesa también juega un papel importante, entre mayor sea el tamaño de las partículas y/o sus densidades, mayor debe ser el ángulo para obtener una mayor selectividad y con ello un mejor enriquecimiento (diferencia notoria entre las zonas de corte de concentrados medios y colas). (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)



Figura 1.8 Mesa vibratoria tipo Deister

Fuente: (River, 2017)

La velocidad de esta agua es mínima en la parte baja y máxima en la interfase aire-agua. Si las partículas minerales son introducidas a esta película, las partículas finas se moverán más rápido que las gruesas ya que se localizarán en la parte alta de la película. En contraste las partículas de alta densidad se moverán más lentamente y terminarán reportándose en el extremo de descarga. (Almaguer, 2007)

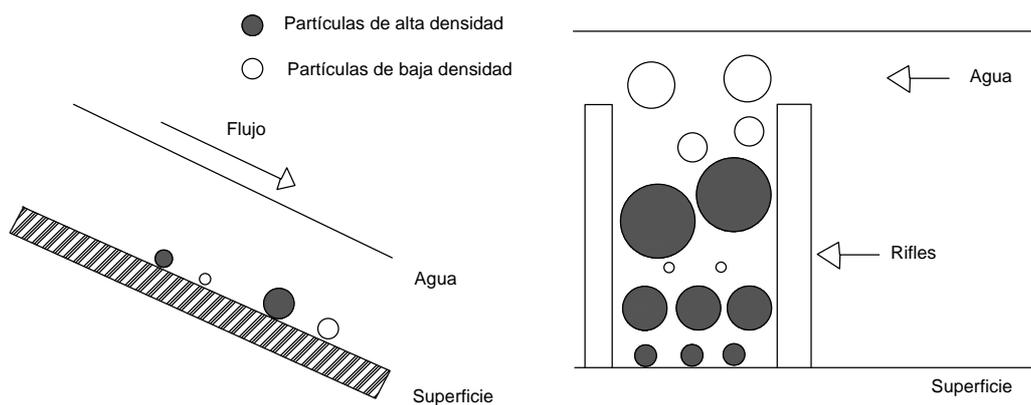


Figura 1.9 Movimiento de partículas y acción de rifles en una mesa concentradora

Fuente: (Almaguer, 2007)

1.2.7.2.2. Características operacionales

Las características operacionales de las mesas vibratorias en etapa “rougher”, etapa “cleaner” y en el tratamiento de partículas finas y gruesas son las siguientes:

- Etapa rougher

Más agua, más mena, más inclinación, golpes más largos, rifles completos. (Almaguer, 2007)

- Etapa “cleaner”

Menos agua, menos mena, menor inclinación, golpes más cortos, “rifles” parciales. (Almaguer, 2007)

- Alimentación fina

Menos agua, menos alimentación, mayor velocidad, golpes más cortos, “rifles” bajos. (Almaguer, 2007)

- Alimentación gruesa

Más agua, más alimentación, menor velocidad, golpes más largos, “rifles” altos. (Almaguer, 2007)

1.2.7.2.3. Variables de operación de las mesas vibratorias

Variables de diseño

- Forma de la mesa.
- Material de la superficie de la mesa.
- Forma de los rifles.
- Características de los rifles.
- Aceleración y desaceleración.
- Ubicación de la alimentación.

Controles operacionales

- Inclinación de la mesa.
- Densidad de la pulpa en la alimentación.
- Agua de lavado.
- Posición de los cortadores de los productos.

1.2.7.2.4. Mecanismos de separación de la mesa vibratoria

Los mecanismos de separación que actúan en la mesa vibratoria pueden ser mejor comprendidos si se consideran separadamente la región de la mesa con “rifles” y la región lisa. (Pavez, 2008)

Las partículas minerales alimentadas transversalmente a los “rifles”, sufren el efecto del movimiento asimétrico de la mesa, resultando en un desplazamiento de las partículas para adelante; las pequeñas y pesadas se desplazan más que las gruesas y livianas. En los espacios entre los “rifles”, las partículas se estatifican debido a la dilatación causada por el movimiento asimétrico de la mesa y por la turbulencia de la pulpa a través de los “rifles” (Pavez, 2008)

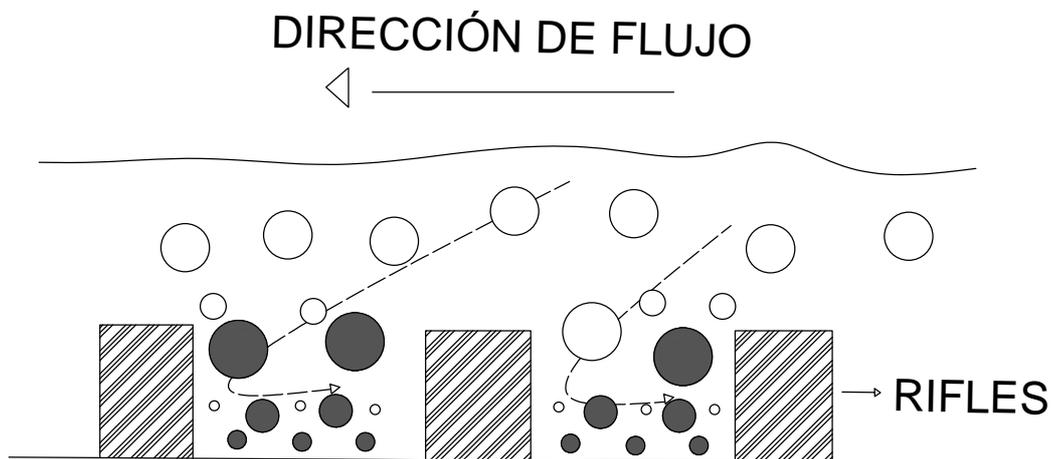


Figura 1.10 Estratificación vertical de las partículas entre los “rifles”

Fuente: (Pavez, 2008)

La concentración final tiene lugar en la región lisa de la mesa, donde la capa de material se presenta más fina. La resultante del movimiento asimétrico en la dirección de los “rifles” y de la velocidad diferencial en escurrimiento laminar, perpendicularmente, es el esparcimiento de los minerales. (Pavez, 2008)

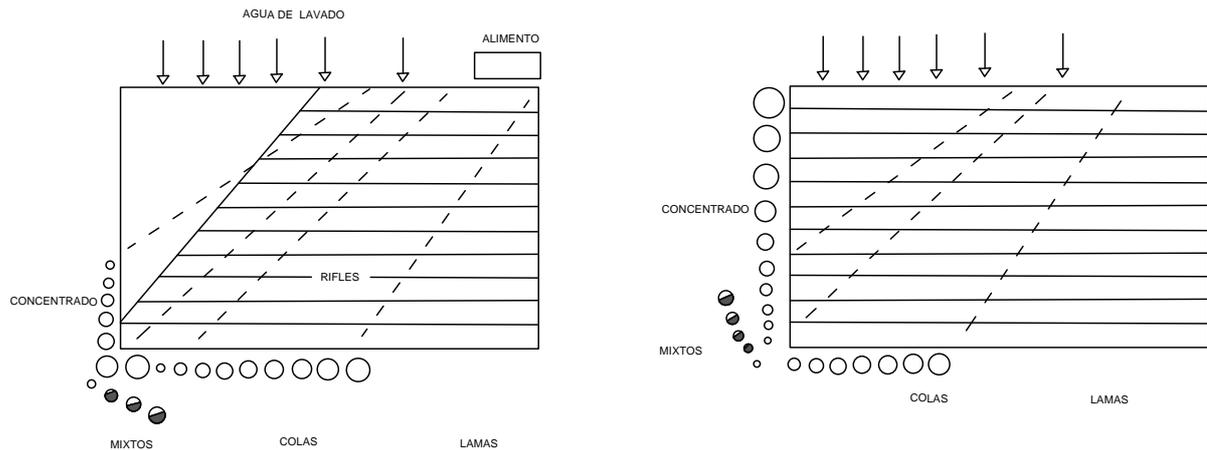


Figura 1.11 Movimiento de las partículas en una mesa vibratoria parcialmente “riffleada” y una mesa vibratoria totalmente “riffleada”.

Fuente: (Pavez, 2008)

1.2.7.2.5. Características de la concentración en mesas concentradoras

El revestimiento del deck podía ser de linóleo, goma natural y sintética, uretano, metano impregnado de zircón o fibra de vidrio. (Israel, 2014)

- El límite superior del tamaño de partículas minerales tratadas en las mesas vibratorias es de aproximadamente 2 a 3 mm (para carbón puede llegar hasta 15 mm), mientras que el tamaño mínimo de las partículas que se pueden concentrar en estos equipamientos es del orden de 75 micrones. Es necesario señalar que el tamaño mínimo de los materiales que se pueden tratar en una mesa es función del volumen de agua y del movimiento de la mesa, siendo esencial que las partículas sedimenten para que puedan ser recogidas en el concentrado. (Israel, 2014)

- El porcentaje de sólido de la pulpa de alimentación debe ser suficientemente bajo para permitir la estratificación y dilatación entre los rifles. Densidades de pulpas máximas típicas son 25% de sólidos para arenas y 30% para materiales finos. (Israel, 2014)
- El aumento de la inclinación lateral reduce la necesidad de agua de lavado, sin embargo, estrecha los rangos de las diferentes fracciones, dificultando el corte, lo que puede ser aceptable en operaciones rougher y no en etapa cleaner. (Israel, 2014)

1.2.7.2.6. Ventajas

- Descarga continua de productos
- Permite obtener toda una gama de productos (concentrados, mixtos, colas)
- Comportamiento visible del material sobre el tablero
- Costo relativamente bajo (de producción local)
- Manejo y supervisión relativamente simple (t/h)
- Posibilidad de recuperar otros minerales valiosos acompañante (Israel, 2014)

1.2.7.2.7. Desventajas

- Precio relativamente alto (en relación con su capacidad)
- Requiere alimentación constante
- Requiere supervisión continua
- Requiere motor (Israel, 2014)

1.2.7.3. Espiral

Los concentradores de espiral son equipos de concentración utilizados principalmente para la preconcentración de oro y sulfuros auríferos. El típico concentrador canaleta helicoidal con cuatro a seis vueltas. (AREQUIPA, 2016)

1.2.7.3.1. Funcionamiento

Su funcionamiento puede ser comparado con el de una batea cónica, donde las partículas livianas se mueven por la acción del agua hacia el borde y las partículas pesadas se concentran en el centro. Se puede considerar al concentrador de espiral como una serie de bateas superpuestas y conectadas. El principio de funcionamiento de la espiral es una combinación de escurrimiento laminar y acción centrífuga. (PINEDA, 2013)

La pulpa (slurry) es introducida en la parte superior de la espiral, sobre el canal semicircular, a través de un distribuidor de alimentación (feed box) e inmediatamente la pulpa es sometida a una fuerza centrífuga generada gracias a la geometría de la espiral. Las partículas más ligeras son llevadas más rápidamente por el empuje de la lámina fluyente, alcanzando una mayor velocidad tangencial que facilitará su ascenso hacia la periferia de la artesa mientras que las partículas más pesadas serán dirigidas hacia la zona próxima de la columna central, como consecuencia de su menor velocidad tangencial facilitada por una menor velocidad del flujo de agua debido a la fricción con la superficie (según Mitchell).

Según Taggart el movimiento helicoidal que adquiere la pulpa en su bajada, hará que las partículas más pesadas se dirijan a la zona interna por saltación mientras que las partículas más ligeras se dirigirán a la zona externa por suspensión. (Fuente, 2015)

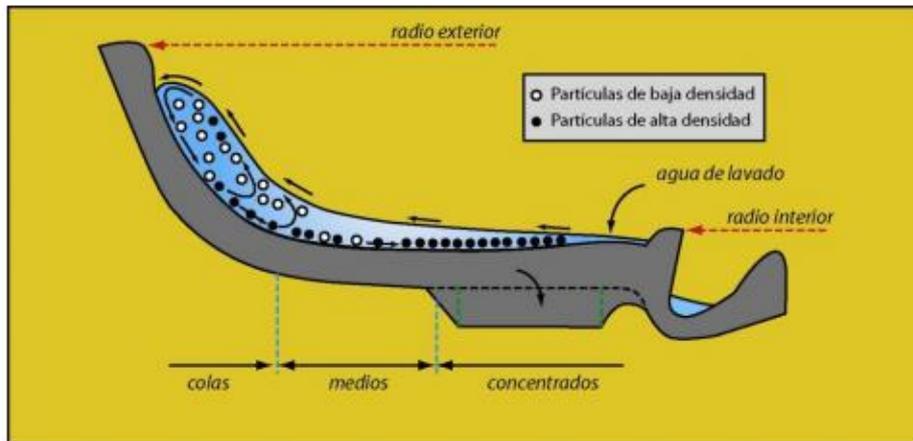


Figura 1.12 Sección transversal de la artesa de una espiral y distribución de las partículas sobre ella.

Fuente: (Fuente, 2015)

La rotación de la corriente actúa en el sentido de remover los minerales pesados en dirección a las aberturas y los minerales livianos para el interior de la corriente, de tal forma que adquieran trayectorias diferentes y se separen. En la figura se muestra esquemáticamente la distribución de las partículas en la sección transversal de una espiral. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

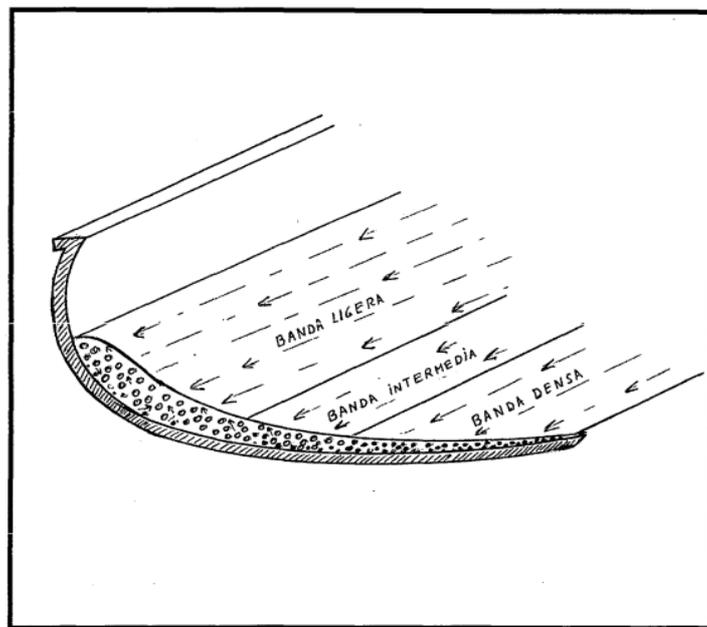


Figura 1.13 Sección transversal de un espiral mostrando la posición de las bandas densa intermedia y ligera.

Fuente: (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

El principio de funcionamiento de la espiral es una combinación de escurrimiento laminar y acción centrífuga. (PINEDA, 2013)

En comparación con las mesas vibratoras y con los concentradores centrífugos, las espirales son significativamente más económicas (Choque, 2017)

El espiral se utiliza principalmente para la preconcentración directamente después del molino. Es importante revisar altura, ángulo de la espiral, caudal de agua y puntos de descarga del concentrado.

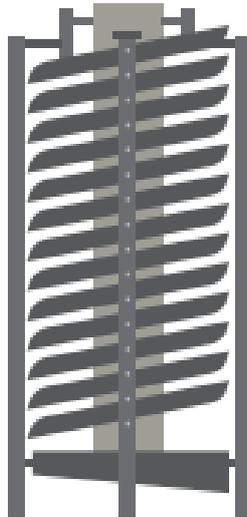


Figura 1.14 Modelo de espirales.

Fuente: (Mignova, 2017)

1.2.7.3.2. Parámetros de operación

Las espirales pueden manejar un rango de tamaños tan amplio como 3 mm y 75 μm (1.2 mm y 150 μm para el carbón). Pero para óptimas separaciones se aconseja la clasificación hidráulica de la alimentación. (Fuente, 2015)

La capacidad de tratamiento por artesa helicoidal (start) puede variar entre 1 y 4 t/h de mineral. En tratamiento de carbón se pueden llegar a alcanzar 5 t/h. (Fuente, 2015)

La pulpa de alimentación puede contener un porcentaje de sólidos en peso comprendido entre 15 y 45 % (25 - 40 % en carbón)

1.2.7.3.3. Clasificación de espirales

Las espirales se dividen en dos tipos: espirales de múltiples retiradas y espirales de retiradas limitadas. La tecnología se está inclinando a la construcción de espirales con menos puntos de retiradas del concentrado, varias con un único punto en el fondo de la hélice. También el agua de lavado ha sido reducida e incluso en algunos casos ha sido eliminada. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

1.2.7.3.4. Características de las espirales

La espiral consiste en un canal helicoidal cilíndrico con sección transversal semi circular modificada. En la parte superior existe una caja destinada a recibir la alimentación en forma de pulpa. A medida que ella se escurre, las partículas más pesadas se encuentran en una faja a lo largo del lado interno del flujo de la pulpa y son removidas por aberturas localizadas en la parte más baja de su sección transversal. (CARBAJAL MARTÍNEZ & CHÁVEZ BASURCO, 2015)

Características funcionales de un espiral

- La capacidad de tratamiento de sólidos varía de 0,5 a 2,5 ton/h, la tasa más utilizada es 1,5 ton/h. El flujo de pulpa de la alimentación depende de las características de la mena. Para materiales finos se aconsejan flujos de 50 a 60 l/min; para materiales medios, 70 a 90 l/min y para materiales gruesos, entorno de 110 l/min. (Pavez, 2008)
- El consumo de agua para cada espiral, incluyendo el agua de lavado, varía de 50 a 110 l/min. Industrialmente, esta agua es normalmente recuperada y recirculada. Debe señalarse que la nueva generación de espirales no necesita aporte de agua de lavado (“waterless”), ya que funciona eficientemente sin e luso de esta agua. (Pavez, 2008)

- El porcentaje de sólidos es de 20 a 30%, pulpas que contienen granulometría gruesa pueden operar con hasta 50% de sólidos. Sin embargo, las espirales más modernas pueden trabajar con porcentajes de sólidos superiores a los convencionales, 30 a 50%. (Pavez, 2008)
- Los límites granulométricos de los minerales pesados contenidos en la pulpa deben ser de 8 mallas hasta 200 mallas. El tamaño de los minerales de bajo peso específico contenido en la pulpa no es crítico, pudiendo variar hasta 4 mallas sin perjudicar el desempeño. Cuanto más amplio es el rango granulométrico, menor será la eficiencia del equipo. Por otra parte, debe señalarse que la eficiencia de las espirales disminuye para granulometrías inferiores a 200 mallas. (Pavez, 2008)
- La diferencia de pesos específicos entre los minerales útiles y los minerales de la ganga debe ser siempre mayor que 1,0 para que se obtenga una concentración satisfactoria. La eficiencia tiende a incrementarse con el aumento de los pesos específicos de los minerales pesados. (Pavez, 2008)
- La forma o tamaño de las partículas puede influir de tal forma a la concentración que, en ciertos casos, tratando minerales de pesos específicos muy próximos se puede alcanzar una buena separación (Pavez, 2008)

A menudo un proceso de concentración gravitacional, a similitud de los procesos de flotación, precisa de varias etapas de concentración: desbaste (“rougher”), limpieza (“cleaner”), afino (“re-cleaner”), barrido (“scavenger”). En la figura 1.15 se presenta un circuito de concentración gravimétrico con espirales en tres etapas. (Pavez, 2008)

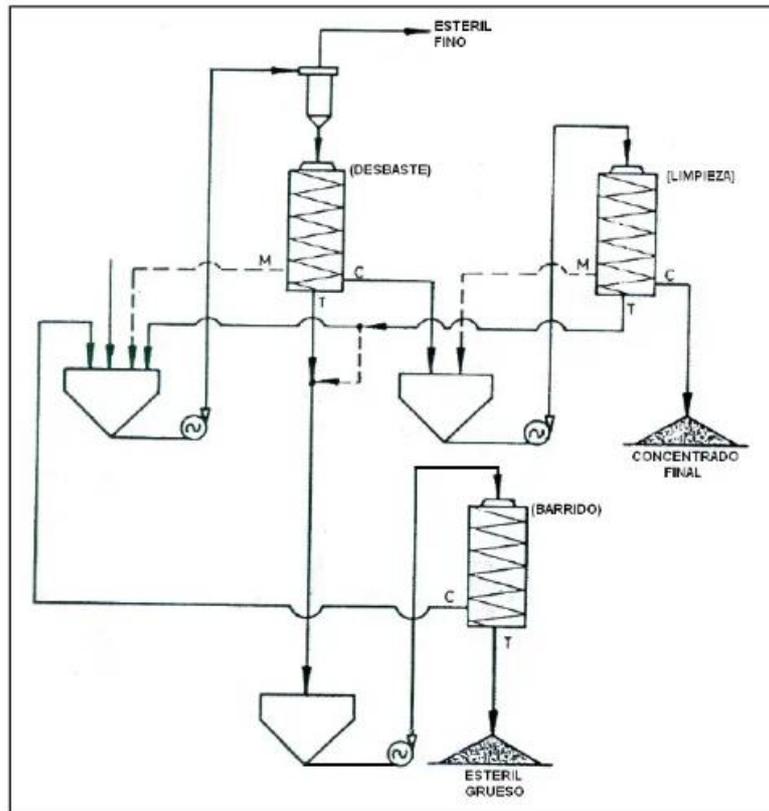


Figura 1.15 Flow sheet de concentración gravitacional utilizando espirales en tres etapas.

Fuente: (Pavez, 2008)

1.2.7.3.5. Aplicaciones

Las aplicaciones de las espirales serían las siguientes:

- Producción de un concentrado y un relave en una etapa solamente.
- Producción de un concentrado final y el relave se trata en otro proceso.
- Producción de un concentrado "bulk" de varios minerales pesados (la separación se realiza por otro proceso) y un relave final.
- Tratamiento del material "scavenger" de otro proceso.
- En un circuito cerrado de molienda, recuperando los minerales pesados y liberados.

1.2.7.3.6. Ventajas

- Permite obtener una gama de productos (concentrados, mixtos, colas).
- Comportamiento visible del material.
- Buena recuperación de oro fino y de sulfuros.
- Manejo y supervisión simple.
- Descarga de los productos en forma continua.
- Alta capacidad (hasta 50t/d para un espiral simple)
- No requiere motor.
- Precio moderado.

1.2.7.3.7. Desventajas

- Necesita material de alimentación menor a 1mm
- Bajo grado de enriquecimiento (por esto, mayor uso en la preconcentración).
- Necesita altura de 4m entre alimentación y descarga (natural o con bomba).
- Producción local muy difícil.

1.3. Relaves mineros

Son material de descarte proveniente del proceso de concentración de los minerales, formados por una suspensión en agua de fragmentos de roca previamente sometidas a molienda. Los relaves mineros contienen diversas sustancias, algunas altamente tóxicas. (López, 2003)

Toda planta de concentración de minerales, produce o genera un volumen de relaves que es por lo general, en dos terceras partes superior al volumen original de mineral extraído de las galerías mineras o de las superficies, por lo que para el tratamiento de este relave y su posterior disposición se debe contar con un área suficientemente grande para su almacenamiento. (Villanueva, 2007)



Figura 1.16 Tranque de relaves.

Fuente: (Falcón, 2017)

1.3.1. Depósitos de relaves

Es una obra que se construye para contener en forma segura los relaves provenientes de una planta de tratamiento o beneficio de minerales por flotación. (Falcón, 2017)

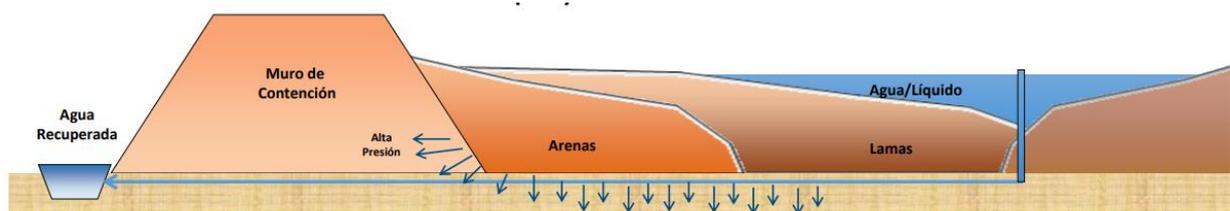


Figura 1.17 Deposito de relaves mineros.

Fuente: (Falcón, 2017)

1.3.2. Principales problemas

Dentro de los principales problemas que generan los relaves están:

- Sólidos en suspensión y metales disueltos
- Reactivos que provienen de planta concentradora.
- Generación de aguas ácidas y lixiviación de metales a largo plazo.
- Requerimiento de grandes áreas de superficie para su almacenamiento. (Villanueva, 2007)

1.3.3. Tipos de depósitos de relaves

Depósitos superficiales

Depósitos con Muro de Arenas del Relave

Depósitos con Muro de Empréstimo

Depósitos de Relaves Espesados

Depósitos de Relaves en Pasta

Depósito de Relaves Filtrados

Depósitos subterráneos

Depósitos en Minas Subterráneas en Operación

Depósitos en Minas Subterráneas Abandonadas

Depósitos en Excavaciones Abiertas

Depósitos marinos o lacustres

Depósitos Submarinos

1.3.4. Relaves: De Residuos a Recursos

El avance industrial y científico ha necesitado la incorporación de una mayor cantidad de elementos para fabricar nuevos y más eficientes productos tecnológicos.

Muchos de estos elementos están contenidos en los relaves, por lo que el desafío es identificarlos y recuperarlos. (son los yacimientos del futuro). (Palma, 2017)

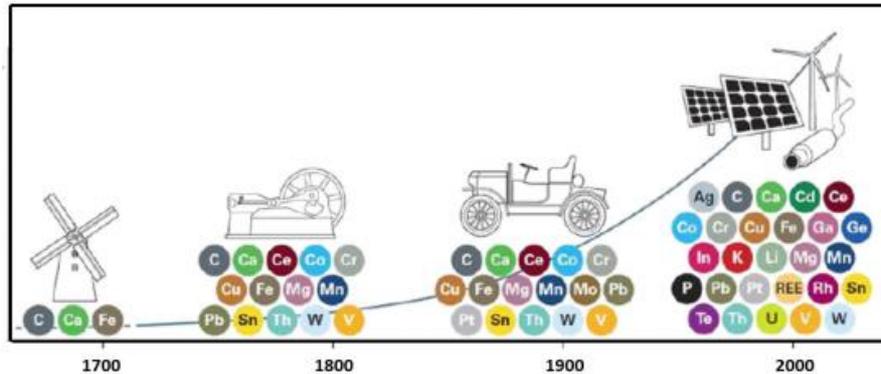


Figura 1.18 Aprovechamiento de relaves.

Fuente: (Palma, 2017)

La empresa pública chilena Codelco, dedicada a la explotación de recursos mineros de cobre y subproductos, ha adjudicado la construcción y operación de la primera minicentral hidroeléctrica de pasada del mundo que utilizará relaves –residuos generados en la minería– para producir energía, en la mina El Teniente, ubicada en la comuna de Machalí, a 120 km al sur de Santiago. (Valdebenito, 2016)

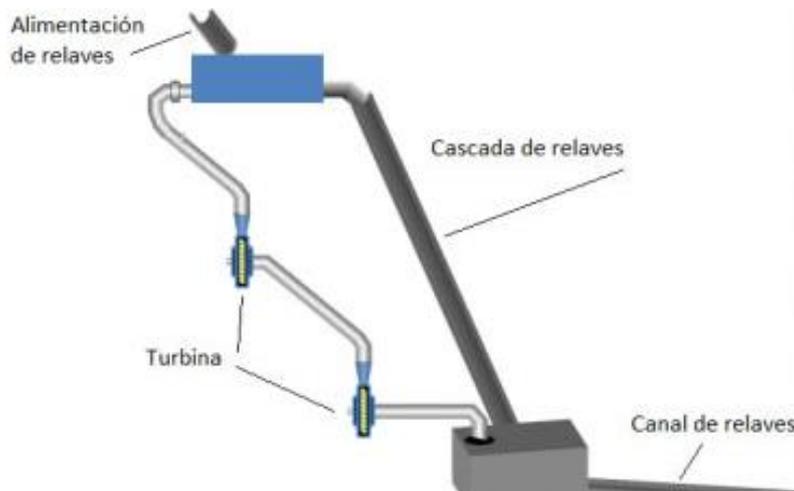


Figura 1.19 Diagrama de la central.

Fuente: (Valdebenito, 2016)

ESTADO DEL ARTE

A nivel internacional:

Anicama Acosta Gerson Alfredo en el año 2010 con su investigación titulada Estudio Experimental del Empleo de Materiales de Desecho de Procesos Mineros en Aplicaciones Prácticas con Productos Cementicios. Dentro del cual planteó como objetivos: 1.- Verificar, dentro de un grupo de 3 muestras de relave minero a través de ensayos experimentales la factibilidad del uso de estos en concreto. 2.- Proponer aplicaciones prácticas para el concreto encontrado; que puedan usarse en poblaciones cercanas a las operaciones mineras.

Dónde finalmente concluyó que con un diseño con 2% de reemplazo de cemento por relave, la resistencia a la compresión no se verá afectada. Es decir, para un concreto convencional de 210 kg/cm² de resistencia se podría reciclar relave minero en una cantidad de 5.10 kg/m³.

Y además al proponer reemplazos de cemento en mezclas de concreto, de manera indirecta estamos contribuyendo con nuestro medio ambiente ya que la producción de cemento es una de las más contaminantes por su consumo de combustibles fósiles y la liberación de CO₂.

También Camero Hermoza Pedro en el año 2000 con su trabajo llamado Encapsulamiento Concurrente de la Pirita en Presas de Relaves planteó como objetivo general proteger el medio ambiente de la acción contaminante de aguas ácidas generadas desde los depósitos de relaves. Dónde se propone la separación, por flotación, de la Pirita contenida en los relaves provenientes de la planta concentradora, previamente clasificados mediante un ciclón y almacenamiento del concentrado de Pirita por inmersión, en las zonas de finos del estanque de una presa de relaves, logrando así, su encapsulamiento y el relave final obtenido en este proceso, al que se denominará relave neutro. La comprobación mediante laboratorio que es factible obtener mediante la flotación, concentrados de Pirita con contenidos de 19 al 20% y Azufre de 4.90 a 5.05%.

La empresa BIOTEQ Environmental Technologies Inc. con Óscar López como gerente general en Latinoamérica es el encargado de la recuperación del valor de los residuos mineros y relaves mediante tratamiento físico-químico por un intercambio iónico y precipitación de sulfuros ha logrado recuperar selectivamente materiales de interés

disponibles en toda clase de desecho minero, desde relaves hasta pilas agotadas de lixiviación obteniendo buenos resultados de concentrado de valor económico y eliminando la contaminación que estos causan o pudiesen llegar a causar.

A nivel Nacional:

El Dr. Joaquín Delgado en el programa Prometeo con un proyecto denominado: “Experiencia piloto en la remediación y mitigación de sulfuros y la generación de AMD en las relaveras del distrito minero de Zaruma-Portovelo” con cuyo objetivo principal fue iniciar una experiencia piloto en el tratamiento/remediación de la contaminación minera, con la puesta en funcionamiento de 1 parcela experimental centrada principalmente en la mitigación de la oxidación de sulfuros de relaves a depositarse en la relavera comunitaria del distrito minero de Portovelo-Zaruma y 1 planta piloto experimental para el tratamiento mediante DAS (sustrato alcalino disperso) de los AMD producidos en dicha relavera.

Dentro del experimento se concluyó que los relaves con gran capacidad de generación de acidez deben ir en una piscina sobre los relaves que presentan gran cantidad de potencial neutralizando y por encima de todos estos una capa de material alcalino altamente reactivo para evitar la continua oxidación de sulfuros y la acidificación del suelo; y con las reacciones que se darán se creará un material sellante en la superficie lo que será un material cementante que inhibirá la entrada de O_2 y agua superficial eliminando así la oxidación y provocando el encapsulamiento del material acidificante.

CAPÍTULO II

2. Desarrollo del Experimento

2.1. Descripción del Experimento

El Experimento consiste en la concentración gravimétrica de minerales de Cu y Ag contenidos en relaves de flotación. Primeramente, se obtuvo el material de una relavera de la planta Excelmoro S.A localizada en el parque industrial minero El Salado, ubicado en la ciudad de Portovelo perteneciente a la provincia de El Oro. Se procedió a homogenizar el material y se mezcló en su totalidad para mediante un cuarteo obtener una muestra representativa para el análisis de laboratorio y conocer los elementos con sus respectivos valores dentro del material. Luego se realizó una clasificación gravimétrica, inicialmente, unas pruebas piloto en los clasificadores a utilizar con una pequeña muestra del material para verificar si el material tiende a concentrarse y establecer el correcto funcionamiento de los equipos y además coordinar implementos a utilizar en el proceso de concentración.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas pilotos y al verificar que el mineral de interés presenta una gran facilidad de concentración visualmente obtenida se procedió a realizar una concentración gravimétrica en la Espiral con 10 kg de relave manteniendo constante el ángulo de giro y lo que se varió fue la densidad de la pulpa (2 pulpas) de 10 % y 15 % y el caudal (3 caudales) en un rango de 60 a 75 l/min que es lo que permite el equipo dispuesto, las pruebas se realizaron por triplicado, luego se enviaron al laboratorio para conocer los resultados y establecer la mejor alternativa de concentración en la espiral.

Seguidamente se ejecutó el proceso de clasificación gravimétrica con 10 kg de Material para cada prueba en la mesa vibradora manteniendo constante la inclinación longitudinal de 1° y variando la inclinación vertical con una diversificación por unidad de 1° a 3°; y el caudal de agua cambió en dos valores, las pruebas de concentración se realizaron por triplicado para verificar si son correctos los resultados del proceso o conocer la variación que este pueda presentar. Se obtuvieron diversos concentrados los cuales para un análisis debieron ser enviados al laboratorio para conocer con que o con cuales parámetros se obtuvieron los mejores resultados.

Finalmente se analizaron las posibles alternativas de tratamiento de relaves tomando en consideración que alternativa o alternativas resultaron ser más eficientes recuperando el material de interés y con qué condiciones de trabajo de cada equipo se lograron estas recuperaciones. Con los resultados obtenidos anteriormente se realizó el diseño de varios flujogramas para determinar cuál resulta ser el proceso más eficiente.

2.2. Ubicación e información de la Planta de Relave

Nombre de la empresa: EXCELMORO S.A - Planta de beneficio Reina de Cisne.

Representante Legal: Ing. Juvito Belduma.

Dirección: Portovelo, Barrio El Salado - Vía a Loja

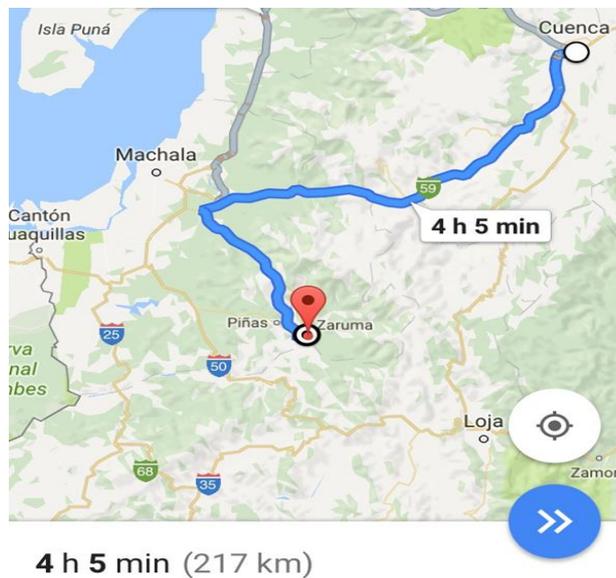


Figura 2.1 Dirección de la empresa Excelmoro S.A

Fuente: (Google maps)

Tipo de vía: Asfalto.

2.3. Trabajo de Campo: Muestreo

El material (muestra compuesta) se tomó en la relavera de esta planta de beneficio, se realizó una toma de material de 10 partes diferentes de la relavera para su posterior mezcla, cuarteo y homogenización; se cogió de la muestra compuesta una cantidad de 1 kg para el análisis de laboratorio. Los análisis se realizaron en un laboratorio certificado ubicado en el cantón Portovelo.

Los materiales utilizados para la toma y transporte del material fueron pala, lona de plástico, fundas plásticas, saquillos blancos y cintas plásticas para cerrar los contenedores.

El procedimiento fue coger una cantidad de alrededor de 400 kg y colocarlo en la lona plástica para su secado a temperatura ambiente, luego de un par de días se dio la mezcla y homogenización para posteriormente colocarlos en las fundas plásticas, estas deben cerrarse con cintas y posteriormente dichas fundas ponerlas dentro de los saquillos, también se deben cerrar con correas plásticas. Cada saquillo debe estar enumerado y con el destino de arribo; todo este proceso se realiza para obtener una guía de transporte del material por parte de la empresa ya que, está prohibido el transporte de material proveniente de plantas y minas fuera del cantón sin tener un documento que sustente el origen, destino y el uso que se le va a dar.



Figura 2.2 Material de relave

Análisis de laboratorio

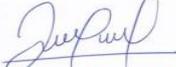


RUC: 0703460188001
 Telf. : 0991518767 – 0986367332
 E-mail: goldenlab@hotmail.es
 www.goldenlab.com.ec

Solicitante: **Andrés Coronel**
 Método: **E.F.+AA** (Ensayo al fuego y lectura en Absorción Atómica)
 Fecha de reporte: **05/06/2019**

Reporte N° 23034

#	CÓDIGO	Fecha Muestreo	Au-g/TM	Ag-g/TM	%Cu	%Pb	%Zn	%As	%Fe	%H
			Oro-total	Plata-total	Cobre	Plomo	Zinc	Arsénico	Hierro	humedad
			E.F	E.F	AA	AA	AA	EDL	AA	AA
1	Relave	04/06/2019	0,33	6,10	0,11	0,03	0,09		3,18	


 Ing. Químico Julio Rigchag G.
 Reg. SENESCYT 1011-08-84090



Dirección: Av. Principal Portovelo-Piñas, A pocos metros del Puente de la Florida, Junto a la chatarrera.

Figura 2.3 Análisis de laboratorio

Fuente: (GoldenLab)

Los análisis de laboratorio muestran los elementos disponibles en el relave y la cantidad existente de ellos. Al tener una cantidad interesante de Cu y Ag se procedió a una clasificación gravimétrica por la gran diferencia de densidad que existe en estos elementos y por su fácil separación.

2.4. Preparación del Material

2.4.1. Secado

El material se secó a temperatura ambiente, este proceso se dio tanto en la planta cuando el material se encontraba en saquillos como en los laboratorios de la universidad al tender el material sobre una lona plástica.

2.4.2. Trituración

El material seco formó una gran cantidad de conglomerados el cuál se debió deshacer para mantener la granulometría natural del relave, generalmente pasante la malla #100. Para lo cual se realizó una trituration primaria, como es utilizando una trituradora de mandíbulas y una de rodillos; todo el material se pasó por este proceso destruyendo los conglomerados y con un posterior tamizaje del material en una malla de apertura de 4 mm únicamente para que separe el material arcilloso que se encontraba aún conglomerado formando una especie de hojuelas del material que se encontraba ya triturado y listo para el proceso de concentración. Luego el material no pasante la malla de 4 mm se procedió a secar y regresarlo por el proceso de trituration con rodillos para separar los conglomerados y así todo el material se encuentre naturalmente como se extrajo de la relavera.



Figura 2.4 Trituradora de rodillos

2.4.3. Cuarteo y Homogenización

El cuarteo se encarga de mezclar el material consiguiendo homogenizarlo, lo que significa tener las mismas características tanto físicas como químicas en todo el material disponible, obteniendo así un material en iguales condiciones para los futuros procesos de clasificación. Se realizó un cuarteo manual con la ayuda de una lona plástica de 4 metros cuadrados, palas pequeñas manuales, espátulas y brochas para desplazar el material de un lado a otro y que todo se mezcle correctamente. Este cuarteo se hizo con alrededor de 400 kg de material del cuál van a ser usados 360 kg para las pruebas a realizar en los clasificadores gravimétricos.

Dicho proceso de cuarteo y homogenización se realizó tomando las esquinas opuestas: el lado A con el lado A y el lado B con el lado B como del cuadrado consiguiendo homogenizar el material; 4 veces seguidas se realizó el proceso esperando tener buenos resultados, esto se hizo con todo el material; y se homogenizó 2 veces más una vez separado el material por partes, en dos partes para ser exactos con 200 kg cada uno, la una parte para la mesa vibratoria y la otra para la espiral Humphrey.



Figura 2.5 Homogenización y cuarteo de material

2.5. Caracterización del Material

Para caracterizar el material se tomó una muestra homogenizada buscando conocer la densidad de este.

2.5.1. Densidad del material

La densidad del material no es más que la relación de la masa del material sobre el volumen de este. Para el cálculo de la densidad se utilizó un picnómetro y una balanza analítica.

El proceso fue el siguiente:

1. Se tomó una muestra del material, esta debe estar completamente seca.
2. Se pesa el picnómetro vacío y tapado, se obtiene un peso 1.
Peso 1 = 20.154 gr.
Se agrega una pequeña cantidad de material, entre 30 y 40% del volumen del picnómetro y se lo pesa obteniendo un peso 2.
Peso 2 = 22.950 gr.
3. El picnómetro que contiene el material se lo llena con agua destilada, y se coloca en la balanza dando como resultado un peso 3.
Peso 3 = 31.817 gr.
4. Se vacía el picnómetro, se lava y seca; y luego se pesa el picnómetro lleno de agua destilada en su totalidad, se tapa y se seca la tapa quitando el exceso o lo derramado, se obtiene un peso 4.
Peso 4 = 30.091 gr.
5. Se aplica la siguiente fórmula para el cálculo de la densidad del material.

La densidad es la relación entre la masa del material seco y la diferencia de pesos calculada que equivale al volumen del material

Dónde:
$$\delta = \frac{\text{Peso de la muestra}}{\text{Volumen}}$$

$$\text{Volumen} = [(P1 + (P4 - P1) + (P2 - P1))] - [(P1 + (P2 - P1) + (P3 - P2))]$$

En resumen

$$\text{Volumen} = (\text{Peso picnómetro} + \text{Peso de agua total} + \text{Peso de muestra}) - (\text{Peso picnómetro} + \text{Peso de muestra} + \text{Peso de agua de aforo})$$

Calculando:

$$\delta = \frac{(P2 - P1)}{[(P1 + (P4 - P1) + (P2 - P1))] - [(P1 + (P2 - P1) + (P3 - P2))]}$$

$$\delta = \frac{(22.950 - 20.154)}{[(20.154 + (30.091 - 20.154) + (22.950 - 20.154))] - [(20.154 + (22.950 - 20.154) + (31.817 - 22.950))]}$$

$$\delta = \frac{2.796}{32.887 - 31.817}$$

$$\delta = 2.613 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}$$

2.5.2. Preparación de Pulpa

El material necesario para cada prueba es de 10 kg, este formó una pulpa para los procesos de clasificación con una fracción de sólidos de 10 y 15 %.

2.5.3. Fracción de Sólidos ϕ_S

La fracción de sólidos es la relación de peso a peso, es decir, el peso del material sólido sobre el peso del sólido más el peso del líquido o masa total.

Se trabajará con una fracción de sólidos de 10 y 15%, en ambos casos con una cantidad de material de 10 kg por lo que la incógnita a calcular será la cantidad de agua necesaria para formar ambas pulpas.

La fórmula de la fracción de sólidos es la siguiente:

$$\phi_S = \frac{m_S}{m_S + m_F}$$

Dónde:

ϕ_S : Es la fracción de sólidos (%).

m_S : Es la masa del sólido (kg).

m_F : Es la masa del fluido (kg).

Cálculos:

- Para $\phi_S = 10\%$ $m_S = 10\text{ kg}$, que cantidad de agua se necesita $m_F = ?$

$$\phi_S = \frac{m_S}{m_S + m_F}$$

$$m_F = \frac{m_S}{\phi_S} - m_S$$

$$m_F = \frac{10\text{ kg}}{0.1} - 10\text{ kg}$$

$$m_F = 90\text{ kg}$$

La masa del fluido es de 90 kg, al tratarse de agua con una densidad de $1 \frac{gr}{cm^3}$ se establece que 1 kg de agua equivale a 1 litro de agua; por lo tanto, el volumen necesario es de 90 litros.

- Para $\phi_S=15 \%$ $m_S=10 \text{ kg}$, que cantidad de agua se necesita $m_F=?$

$$m_F = \frac{m_S}{\phi_S} - m_S$$
$$m_F = \frac{10 \text{ kg}}{0.15} - 10 \text{ kg}$$

$$m_F = 56.67 \text{ kg}$$

Lo que equivale a un volumen de 56.67 litros de agua.

2.5.4. Densidad de Pulpa δp

La densidad de la pulpa es la relación entre la masa de la pulpa y el volumen de la pulpa, se expresa en kg/cm³.

La fórmula por utilizar para el cálculo de la densidad es la siguiente, esta fórmula toma en cuenta la fracción de sólidos para el cálculo de la densidad.

$$\delta p = \frac{1}{1(1-\phi_s) + \frac{1}{\delta_s}(\phi_s)}$$

Dónde:

δp : Es la densidad de la pulpa.

ϕ_s : Es la fracción de sólidos.

δ_s : Es la densidad del sólido.

Se calcula la densidad para:

- Fracción de sólidos de 10% con una densidad del material de $2.613 \frac{gr}{cm^3}$.

$$\delta p = \frac{1}{1(1-\phi_s) + \frac{1}{\delta_s}(\phi_s)}$$

$$\delta p = \frac{1}{1(1-0.1) + \frac{1}{2.613}(0.1)}$$

$$\delta p = 1.065 \frac{gr}{cm^3}$$

- Fracción de sólidos de 15% con una densidad del material de $2.613 \frac{gr}{cm^3}$.

$$\delta p = \frac{1}{1(1-\phi_s) + \frac{1}{\delta_s}(\phi_s)}$$

$$\delta p = \frac{1}{1(1-0.15) + \frac{1}{2.613}(0.15)}$$

$$\delta p = 1.1020 \frac{gr}{cm^3}$$

2.6. Descripción del experimento en la Espiral Humphrey

Previo a realizar el experimento en la espiral se realizó una limpieza y mantenimiento del equipo, se efectuó una prueba piloto para conocer el estado y funcionamiento de este y como se distribuyen los caudales, la entrada del alimento, salida tanto de concentrado como de las colas y, además, establecer el caudal de alimento de la pulpa pues es una variable importante en el experimento.

La prueba piloto se basó en crear una pulpa y pasar por el equipo concentrador observando el funcionamiento y la distribución del material por la espiral. Se observó que de acuerdo con la fracción de sólidos y al caudal de alimento variaba la velocidad de la clasificación, se notó que con un caudal bajo no se creaba una buena línea de separación en la espiral y que con el caudal máximo el material no se separaba adecuadamente. Por lo que, el cálculo del caudal de alimento se desarrolló manualmente obteniéndose los valores a ser utilizados en las pruebas de concentración.

También la prueba piloto ayudó para el desarrollo de un sistema de salida, para evitar mezclas del concentrado con las colas o viceversa, con la ayuda de tuberías y accesorios tanto para que el concentrado vaya a su destino como para que las colas salgan del sistema y evitar una recirculación que podría alterar la concentración principal.

Además, se estableció el valor de las variables a trabajar.

2.6.1. Fracción de Sólidos

Se trabajará con una fracción de sólidos de la pulpa de un 10 y 15% para conocer el funcionamiento del equipo y su desempeño de acuerdo con esta variación.

2.6.2. Caudal de alimento

Para calcular el caudal de alimento se procedió a llenar un recipiente de 11 litros con la pulpa proveniente de la bomba de alimentación y a medir el tiempo de llenado con un cronómetro, dicho proceso se realizó 14 veces ya que se hicieron las mediciones por duplicado tomando tiempos para promediarlos y así sacar el caudal medio a utilizar; se consiguió con este proceso 7 caudales.

Volumen	Tiempo	Q (l/s)	Q (l/min)
11	10.6	1.0377	62.3
11	10.22	1.0763	64.6
11	9.58	1.1482	68.9
11	9.36	1.1752	70.5
11	9.1	1.2088	72.5
11	8.6	1.2791	76.7
11	8	1.3750	82.5

Tabla 2.1. Caudal de alimento en espiral Humphrey

Dentro de los caudales tomados se procedió a escoger tres caudales medios, eludiendo el caudal mínimo y máximo que demostraron no dar buenos resultados.

Los caudales tomados en cuenta para realizar el experimento son:

Volumen	Tiempo	Q (l/s)	Q (l/min)
11	9.58	1.1482	68.9
11	9.1	1.2088	72.5
11	8.66	1.2702	76.2

Tabla 2.2 Caudal de experimento en espiral Humphrey

2.7. Experimento en Espiral Humphrey

Se realizaron 18 ensayos de concentración manteniendo una masa constante de 10 kg de material para cada proceso, se trabajó con una fracción de sólidos en la pulpa de 10 y 15% y con un caudal de alimento el que varía cerca de 3.6 l/min, los valores son 68.9, 72.5 y 76.2 l/min.

2.7.1. Proceso

Para realizar las pruebas se hizo una matriz para la interacción de todas variables a utilizar y establecer la cantidad de pruebas necesarias y su distribución.

VARAIBLES	68.9	72.5	76.2	EXPERIMENTOS
10	B	A	C	
15	D	E	F	

Tabla 2.3 Interacción de variables del experimento en espiral Humphrey

Dan como resultado 6 pruebas necesarias para la interacción de todos los diferentes valores de las variables. Las pruebas se las realizará por triplicado, teniendo así un total de 18 pruebas a realizar.

El proceso de los ensayos por triplicado se lo realiza con la base de que no se conocerá el resultado en sí, en este caso ni la cantidad de concentrado y de peor forma sus concentraciones minerales, tampoco se cuenta con trabajos previos o bibliografía base del experimento; además se la realiza para calcular un promedio de concentración, es decir, calcular el valor medio del peso del concentrado y un valor promedio de sus leyes.

Aquí se observa la cantidad de ensayos a realizar y las variables que se aplican en cada ensayo.

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)	Prueba		Material Prueba (kg)
10	72.5	A	1	10
			2	10
			3	10
10	68.9	B	1	10
			2	10
			3	10
10	76.2	C	1	10
			2	10
			3	10
15	68.9	D	1	10
			2	10
			3	10
15	72.5	E	1	10
			2	10
			3	10
15	76.2	F	1	10
			2	10
			3	10

Tabla 2.4 Interacción de las variable y número de ensayo en espiral Humphrey

Para realizar dicho experimento existen pasos a seguir, se enumerará todo el proceso a seguir para un ensayo, para el resto de los ensayos el proceso será únicamente de cambiar las variables operacionales de acuerdo con la matriz.

1. Se agregó en el tanque de recirculación la cantidad de agua necesaria para formar la pulpa, de acuerdo con la fracción de sólidos a utilizar:
Para una fracción de sólidos de 10% se emplean 90 litros de agua, y para una pulpa de 15% son necesarios 56.67 litros de agua.
2. Se añade el material previamente pesado, 10 kg para cada prueba a realizar.
3. Se deja un tiempo de acondicionamiento para que el material se homogenice de forma correcta, este tiempo va entre 5 a 7 minutos.
4. Se envía la pulpa hacia la espiral de acuerdo con el caudal de alimento que vamos a utilizar.
5. Se da el proceso de concentración gravimétrica en la espiral con una apertura de 7 cm para el ingreso del concentrado. Todo el material considerado ganga es desalojado por los otros dos orificios, no se considera separar mixtos ni colas.
6. Se desaloja todo el material y líquido restante en el equipo para proceder a lavarlo para el resto de las prácticas y así no se den alteraciones en los procesos futuros o en el funcionamiento del equipo.
7. El concentrado es transportado mediante el uso de una manguera a un recipiente colector para su posterior filtrado; se procedió a realizar la separación sólido/líquido por capilaridad.
Se procedió a colocar un trozo de tela tipo gasa, 100% algodón, formando un cordón en el recipiente con el concentrado y se mojó el cordón con el mismo quedando una punta dentro del recipiente y la otra por fuera de este, se dio tal inclinación para que el proceso de capilaridad funcione y se separe la parte sólida de la líquida receptando el agua fuera de este recipiente.
8. El siguiente proceso fue colocar el concentrado en un recipiente metálico para secarlo en un horno.
9. Se pesa el concentrado y se procede a guardarlo en fundas plásticas para su posterior homogenización y cuarteo para el análisis de laboratorio.

A continuación, se calculó el peso promedio del concentrado por cada ensayo y los índices metalúrgicos como son: el factor de concentración, la razón de enriquecimiento y la recuperación para cada metal Cu y Ag.

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)	Prueba		Material Prueba (kg)	Concentrado (kg)	Promedio Concentrado (kg)
10	72,5	A	1	10	0,8415	0,6631
			2	10	0,4289	
			3	10	0,7188	
10	68,9	B	1	10	0,6141	0,7262
			2	10	0,8451	
			3	10	0,7194	
10	76,2	C	1	10	0,5378	0,6432
			2	10	0,6284	
			3	10	0,7633	
15	68,9	D	1	10	0,5667	0,4617
			2	10	0,3689	
			3	10	0,4495	
15	72,5	E	1	10	0,6061	0,6044
			2	10	0,5941	
			3	10	0,6129	
15	76,2	F	1	10	0,4264	0,4857
			2	10	0,5172	
			3	10	0,5136	

Tabla 2.5 Promedio del concentrado en la espiral Humphrey

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)	Prueba	Factor de Concentración
10	72,5	A	15
10	68,9	B	14
10	76,2	C	16
15	68,9	D	22
15	72,5	E	17
15	76,2	F	21

Tabla 2.6 Factor de Concentración en la espiral Humphrey

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)	Prueba	Promedio Concentrado (kg)	Ley de Cabeza	Ley de Concentrado	Ley de Colas	Recuperación Metalúrgica (%)	Razón de Enriquecimiento
				Ag (gr/ton)			Ag	
10	72,5	A	0,6631	6,1	16,73	5,3451	18,19	2,74
10	68,9	B	0,7262	6,1	17,07	5,2410	20,32	2,80
10	76,2	C	0,6432	6,1	12,7	5,6896	12,73	1,98
15	68,9	D	0,4617	6,1	16	5,6208	12,11	2,62
15	72,5	E	0,6044	6,1	14,6	5,5532	14,47	2,39
15	76,2	F	0,4857	6,1	21,53	5,3122	17,14	3,53

Tabla 2.7 Recuperación y Factor de Enriquecimiento de la Plata (Ag) en Espiral Humphrey.

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)	Prueba	Promedio Concentrado (kg)	Ley de Cabeza	Ley de Concentrado	Ley de Colas	Recuperación Metalúrgica (%)	Razón de Enriquecimiento
				Cu (%)			Cu	
10	72,5	A	0,6631	0,11	0,32	0,0951	19,29	2,91
10	68,9	B	0,7262	0,11	0,31	0,0943	20,47	2,82
10	76,2	C	0,6432	0,11	0,3	0,0969	17,54	2,73
15	68,9	D	0,4617	0,11	0,37	0,0974	15,53	3,36
15	72,5	E	0,6044	0,11	0,35	0,0946	19,23	3,18
15	76,2	F	0,4857	0,11	0,42	0,0942	18,55	3,82

Tabla 2.8 Recuperación y Factor de Enriquecimiento de la Cobre (Cu) en Espiral Humphrey.

2.8. Descripción del experimento en la Mesa Vibratoria

En la mesa vibratoria de igual manera que en la Espiral tipo Humphrey se realizó un mantenimiento y verificación del funcionamiento del equipo, así como una prueba piloto para observar cómo se distribuye el material en el proceso de concentración, y el estado del material de alimento, ya sea una alimentación en pulpa o en seco, y también la disposición de recipientes necesaria para almacenar los resultados de dicho proceso.

Además, se establecieron las variables tanto como caudal de alimento, caudal de lavado y los ángulos de inclinación horizontal además se verificó el sistema de salida para la separación del concentrado con el material mixto.

La prueba piloto planteada fue una concentración tanto con alimento en seco como en pulpa, al no disponer de equipo para una alimentación rápida y constante que permita un buen funcionamiento del equipo; se procedió a realizar la alimentación en pulpa obteniendo visualmente una mejor distribución del material con una fracción de sólidos baja, utilizamos una fracción de un 10%, con un caudal de alimento de pulpa igualmente bajo para no saturar el equipo de material y que su trabajo de concentración sea ineficiente. También se pudo observar cómo funciona el caudal del agua de lavado y su efectividad de acuerdo con la cantidad de este sobre el proceso. En la concentración y con la variación de los ángulos se observa los sitios por dónde se desplaza el concentrado y como varía de acuerdo con la angulación y el lavado del equipo. De acuerdo con esto se establecieron el valor de las siguientes variables con las que se va a trabajar:

2.8.1. Fracción de Sólidos

Se trabajará con una fracción de sólidos de la pulpa de un 10%.

2.8.2. Caudal de alimento

El valor del caudal se obtuvo al aumentar el caudal de recirculación del equipo para disminuir el caudal disponible para el alimento. Para lo cual se procedió a llenar un recipiente de 11 litros con la pulpa proveniente de la bomba de alimentación y a medir el tiempo de llenado con un cronómetro, con este proceso se obtuvo un valor mínimo de 19 l/min. Este valor fue probado en la prueba piloto y dio buenos resultados.

2.8.3. Caudal de Lavado

El caudal de lavado es una variable que tomará 2 valores para este proceso, bajo la premisa que mientras menor es el ángulo de inclinación menor es la cantidad de agua necesaria para el lavado.

Los valores del caudal a tomar son de 11 y 14 l/min para el experimento.

2.8.4. Inclinación Horizontal

El equipo clasificador consta con una inclinación máxima de 3°, para realizar los distintos experimentos esta será una variable muy importante.

Los valores por tomar son de 1, 2 y 3°.

2.9. Experimento en Mesa Vibratoria

Se hicieron 18 ensayos de concentración gravimétrica en la mesa vibratoria manteniendo una masa de 10 kg de material constante para cada ensayo, este material dispuesto en una pulpa de 10% de fracción de sólidos con un caudal de alimento de 19 l/min. Las variables utilizadas en estos ensayos fueron el caudal de lavado con valores de 11 y 14 l/min y la inclinación horizontal de la mesa de 1, 2 y 3°.

2.9.1. Proceso

Para realizar las pruebas se hizo una matriz para la interacción de todas variables a utilizar y establecer la cantidad de pruebas necesarias y su distribución.

VARAIBLES	3°	2°	1°	EXPERIMENTOS
11	1	2	3	
14	6	5	4	

Tabla 2.9 Interacción de variables del experimento en la mesa vibratoria

Dan como resultado 6 pruebas necesarias para la interacción de todos los diferentes valores de las variables. Las pruebas se las realizará por triplicado, teniendo así un total de 18 pruebas a realizar.

El proceso de los ensayos por triplicado se lo realiza para calcular un promedio de concentración, es decir, calcular el valor medio del peso del concentrado y un valor promedio de sus leyes.

Aquí se observa la cantidad de ensayos a realizar y las variables que se aplican en cada ensayo.

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba		Material Prueba (kg)
10	11	3	1	1	10
				2	10
				3	10
10	11	2	2	1	10
				2	10
				3	10
10	11	1	3	1	10
				2	10
				3	10
10	14	1	4	1	10
				2	10
				3	10
10	14	2	5	1	10
				2	10
				3	10
10	14	3	6	1	10
				2	10
				3	10

Tabla 2.10 Interacción de las variable y número de ensayo en la mesa vibratoria

Para realizar dicho experimento existen pasos a seguir, se enumerará todo el proceso a seguir para un ensayo, para el resto de los ensayos el proceso será únicamente de cambiar las variables operacionales de acuerdo con la matriz.

1. Preparación de la pulpa

Para preparar la pulpa necesaria de 10% de fracción de sólidos se agregó la cantidad de 90 litros de agua y 10 kg de material en el tanque de recirculación.

2. La pulpa fue homogenizada por un período de 5 a 7 minutos.
3. Se estableció el ángulo horizontal con el cual se trabajará, ya sea 1, 2 o 3°.
4. Apertura del agua de lavado que se distribuyó por toda la mesa a lo largo del eje horizontal desde el alimento hasta el final de la mesa, el camino de este caudal fue en una tubería plástica con agujeros para su esparcimiento igualitario, el caudal varió en los valores de 11 y 14 l/min.
5. Se procedió a alimentar la mesa con la pulpa con un caudal constante de 19 l/min.
6. Separar mediante el uso de una lámina plástica la salida del concentrado para evitar mezclas con el resultado de mixtos y colas que se obtendrán.
Cada producto irá a su respectivo contenedor
7. Una vez que la pulpa de alimento se termine, se dejará por unos minutos el agua de lavado para que así el material residual se siga clasificando gravimétricamente y no tener pérdidas de este.
8. Se separó el agua del concentrado por capilaridad, la parte sólida se coloca en recipientes metálicos y se lo etiqueta para introducir en un horno de secado
9. Se lavaron todos los equipos implicados para los ensayos futuros previniendo que algún material llegue a afectar dichos procesos o alteren el funcionamiento del equipo.

A continuación, se calculó el peso promedio del concentrado por cada ensayo y los índices metalúrgicos como son: el factor de concentración, la razón de enriquecimiento y la recuperación para cada metal Cu y Ag

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba		Material Prueba (kg)	Concentrado (kg)	Promedio Concentrado (kg)
10	11	3	1	1	10	0,2883	0,3469
				2	10	0,2883	
				3	10	0,4640	
10	11	2	2	1	10	0,3233	0,3396
				2	10	0,2885	
				3	10	0,4070	
10	11	1	3	1	10	0,3563	0,3701
				2	10	0,3089	
				3	10	0,4452	
10	14	1	4	1	10	0,4583	0,4391
				2	10	0,4873	
				3	10	0,3717	
10	14	2	5	1	10	0,3567	0,3545
				2	10	0,3377	
				3	10	0,3690	
10	14	3	6	1	10	0,2657	0,3032
				2	10	0,3490	
				3	10	0,2949	

Tabla 2.11 Promedio del Concentrado en la mesa vibratoria

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba	Factor de Concentración
10	11	3	1	29
10	11	2	2	29
10	11	1	3	27
10	14	1	4	23
10	14	2	5	28
10	14	3	6	33

Tabla 2.12 Factor de Concentración en la mesa vibratoria

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba	Promedio Concentrado (kg)	Ley de Cabeza	Ley de Concentrado	Ley de Colas	Recuperación Metalúrgica (%)	Razón de Enriquecimiento
					Ag (gr/ton)			Ag	
10	11	3	1	0,3469	6,1	22,8	5,4999	12,96	3,74
10	11	2	2	0,3396	6,1	26,4	5,3864	14,70	4,33
10	11	1	3	0,3701	6,1	18,4	5,6272	11,16	3,02
10	14	1	4	0,4391	6,1	29,5	5,0253	21,24	4,84
10	14	2	5	0,3545	6,1	52,6	4,3912	30,57	8,62
10	14	3	6	0,3032	6,1	58,5	4,4616	29,08	9,59

Tabla 2.13 Recuperación y Razón de Enriquecimiento de la Plata (Ag) en la Mesa Vibratoria.

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba	Promedio Concentrado (kg)	Ley de Cabeza	Ley de Concentrado	Ley de Colas	Recuperación Metalúrgica (%)	Razón de Enriquecimiento
					Cu (%)			Cu	
10	11	3	1	0,3469	0,11	0,58	0,0931	18,29	5,27
10	11	2	2	0,3396	0,11	0,56	0,0942	17,29	5,09
10	11	1	3	0,3701	0,11	0,51	0,0946	17,16	4,64
10	14	1	4	0,4391	0,11	0,54	0,0903	21,56	4,91
10	14	2	5	0,3545	0,11	0,74	0,0868	23,85	6,73
10	14	3	6	0,3032	0,11	0,72	0,0909	19,85	6,55

Tabla 2.14 Recuperación y Razón de Enriquecimiento del Cobre (Cu) en Mesa Vibratoria

CAPITULO III

3. Resultados

3.1. Espiral Humphrey

3.1.1. Ag

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)		Recuperación Metalúrgica (%)
			Ag
10	72,5	A	18,19
10	68,9	B	20,32
10	76,2	C	12,73
15	68,9	D	12,11
15	72,5	E	14,47
15	76,2	F	17,14

Tabla 3.1 Recuperación metalúrgica de Ag en espiral Humphrey

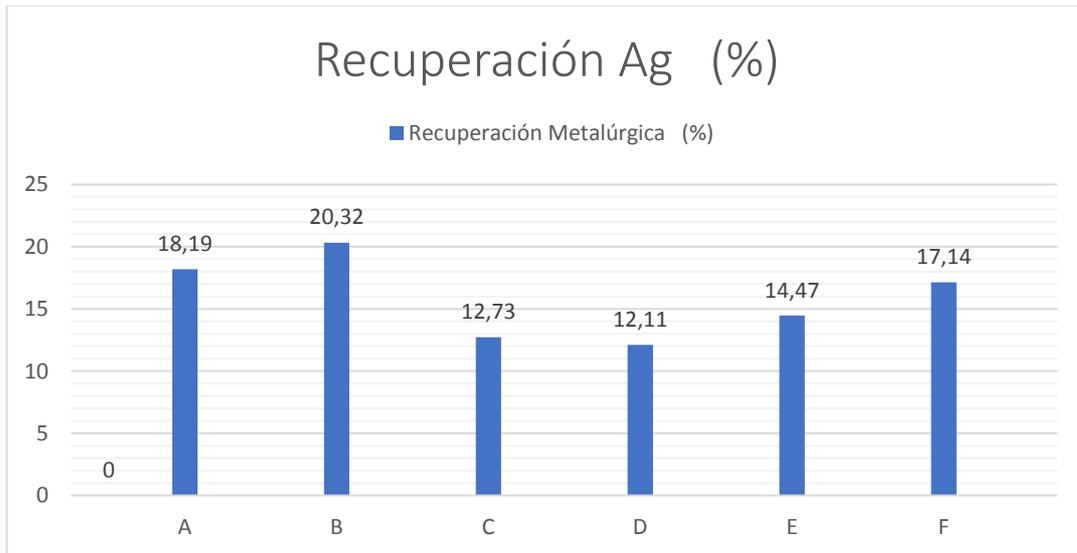


Figura 3.1 Histograma de Recuperación de Ag en Espiral Humphrey

3.1.2. Cu

Fracción de Sólidos (%)	Caudal Alimento (l/min)	Prueba	Recuperación Metalúrgica (%)
			Cu
10	72,5	A	19,29
10	68,9	B	20,47
10	76,2	C	17,54
15	68,9	D	15,53
15	72,5	E	19,23
15	76,2	F	18,55

Tabla 3.2 Recuperación metalúrgica de Cu en espiral Humphrey

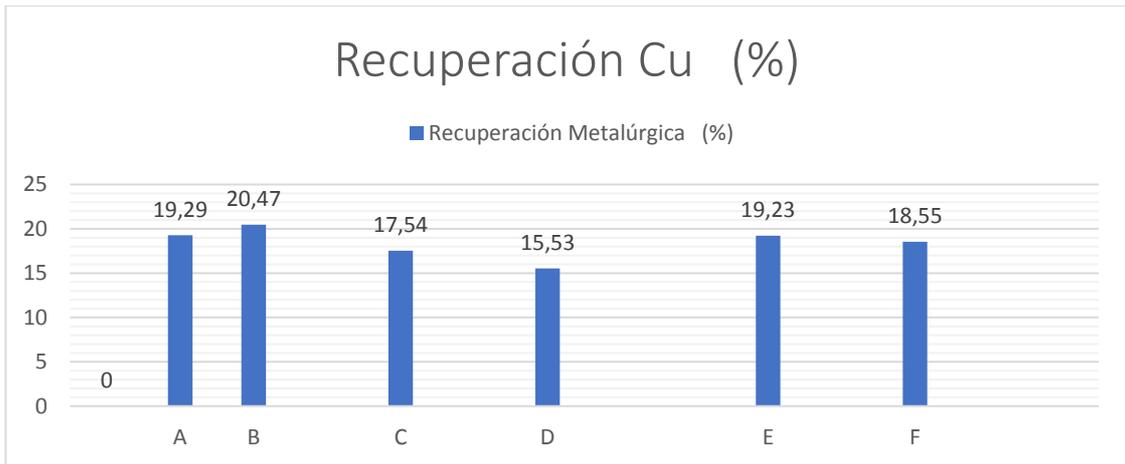


Figura 3.2 Histograma de Recuperación de Cu en Espiral Humphrey

3.1.3. Análisis de Recuperaciones por Equipo de Cu y Ag

	Recuperación Metalúrgica (%) ESPIRAL HUMPRHEY	
	Ag	Cu
A	18,19	19,29
B	20,32	20,47
C	12,73	17,54
D	12,11	15,53
E	14,47	19,23
F	17,14	18,55

Tabla 3.3 Recuperación metalúrgica de Cu y Ag en espiral Humphrey

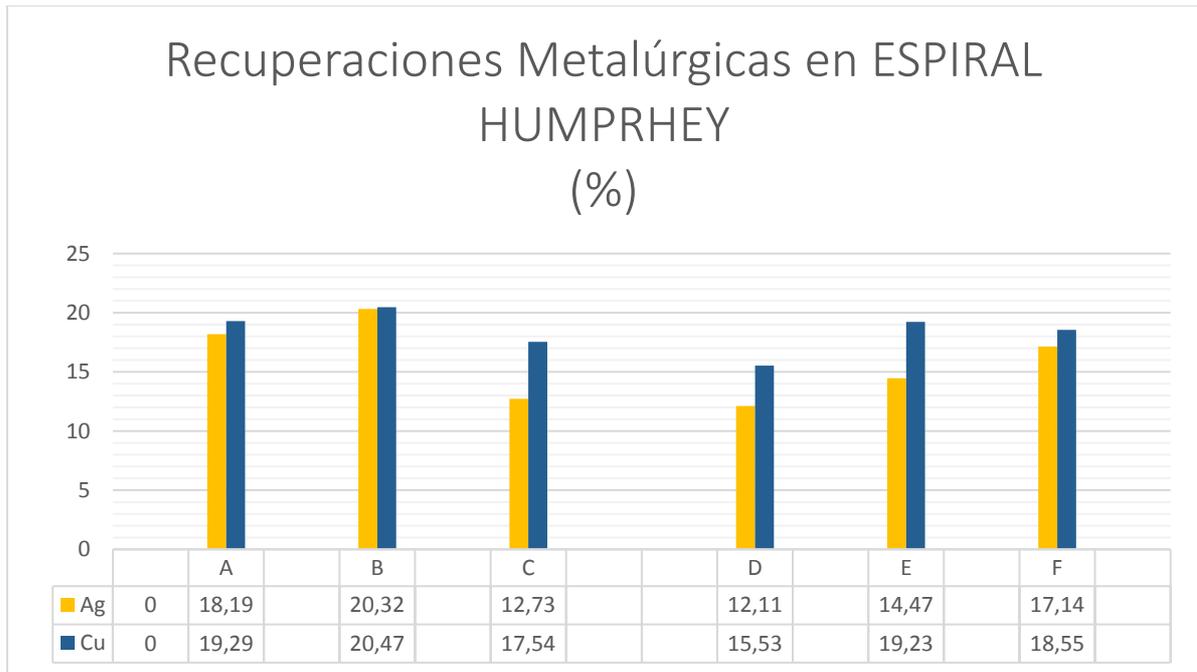


Figura 3.3 Histograma de Comparación de Recuperaciones de Plata (Ag) y Cobre (Cu) en Espiral Humphrey.

3.2. Mesa Vibratoria

3.2.1. Ag

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba	Recuperación Metalúrgica (%)
				Ag
10	11	3	1	12,96
10	11	2	2	14,70
10	11	1	3	11,16
10	14	1	4	21,24
10	14	2	5	30,57
10	14	3	6	29,08

Tabla 3.4 Recuperación metalúrgica de Ag en la mesa vibratoria

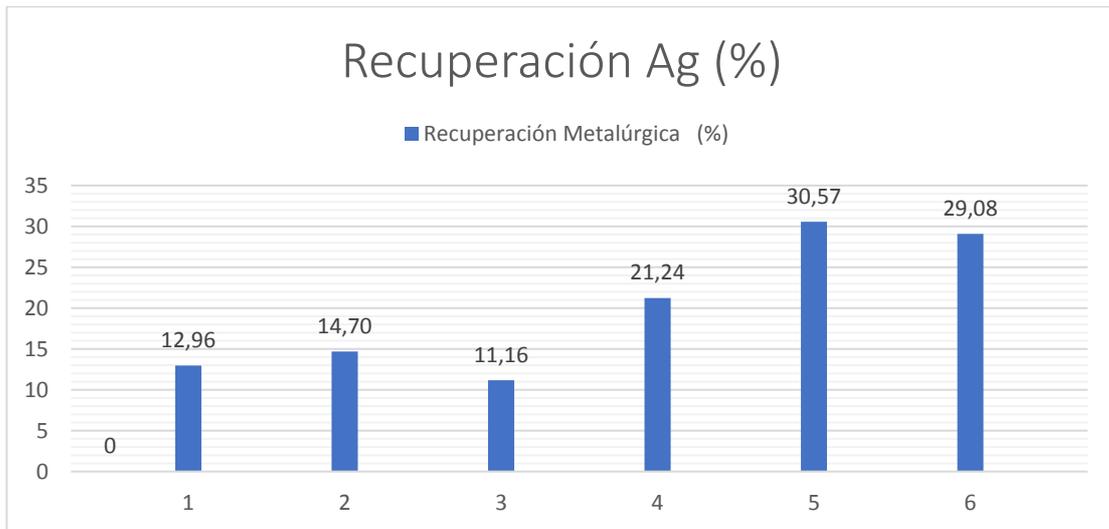


Figura 3.4 Histograma de Recuperación de Ag en Mesa Vibratoria

3.2.2. Cu

Fracción de Sólidos (%)	Caudal de Lavado (l/min)	Ángulo Vertical (°)	Prueba	Recuperación Metalúrgica (%)
				Cu
10	11	3	1	18,29
10	11	2	2	17,29
10	11	1	3	17,16
10	14	1	4	21,56
10	14	2	5	23,85
10	14	3	6	19,85

Tabla 3.5 Recuperación metalúrgica de Cu en la mesa vibratoria

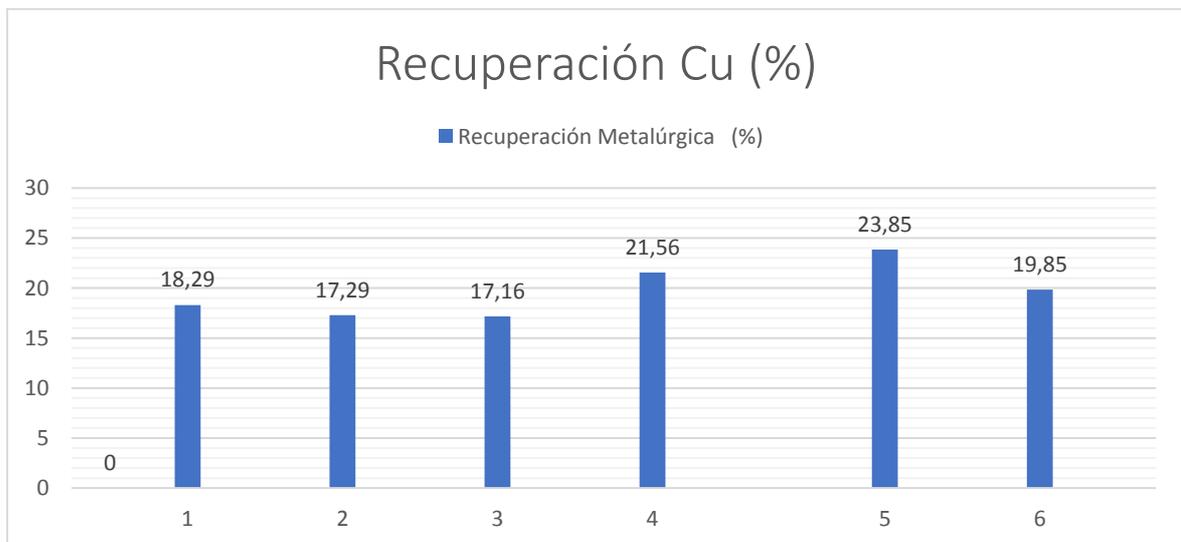


Figura 3.5 Histograma de Recuperación de Cu en Mesa Vibratoria.

3.2.3. Análisis de Recuperaciones por Equipo de Cu y Ag

Prueba	Recuperación Metalúrgica (%) MESA VIBRATORIA	
	Ag	Cu
1	12,96	18,29
2	14,70	17,29
3	11,16	17,16
4	21,24	21,56
5	30,57	23,85
6	29,08	19,85

Tabla 3.6 Recuperación metalúrgica de Cu y Ag en la mesa vibratoria

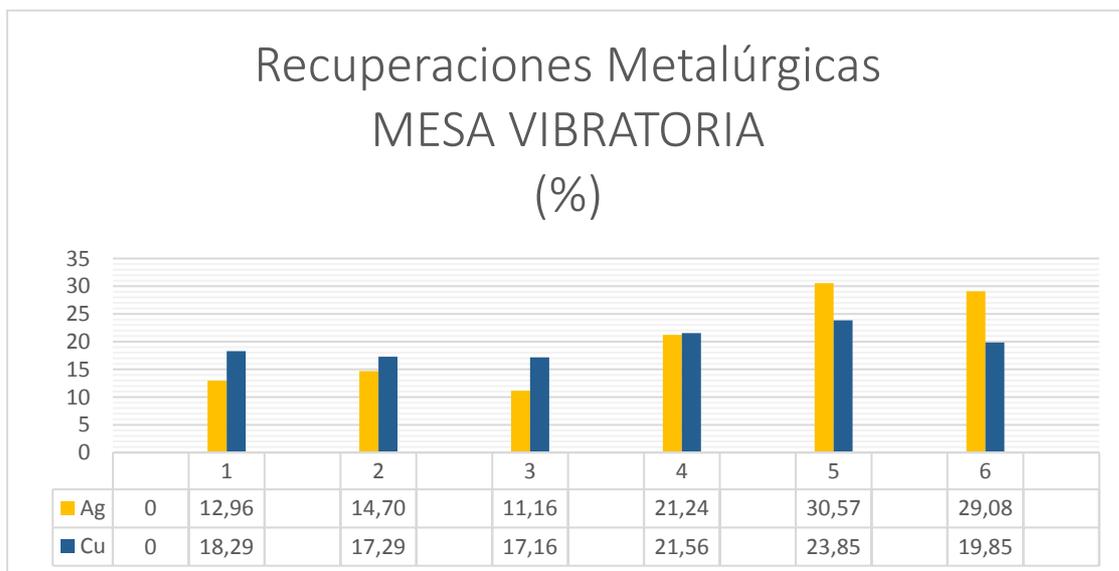


Figura 3.6 Histograma de Comparación de Recuperaciones de Plata (Ag) y Cobre (Cu) en Mesa Vibratoria.

3.3. Análisis de Resultados de la clasificación gravimétrica por equipos

Como se expresa en la siguiente gráfica se obtiene una mejor concentración combinada de Cu y Ag en la mesa vibratoria a comparación con la espiral Humphrey. Cada equipo trabajó con diferentes variables operativas para llegar a estos resultados favorables del experimento, a continuación, se detallan las condiciones de operación para cada equipo:

En la Espiral Humphrey se trabajó con una fracción de sólidos de 10% y un caudal de alimento de 68.9 l/min; mientras que las condiciones operacionales de la mesa fueron un caudal de alimento de 19 l/min, un caudal de lavado de 14 l/min y un ángulo de inclinación longitudinal de 1°.

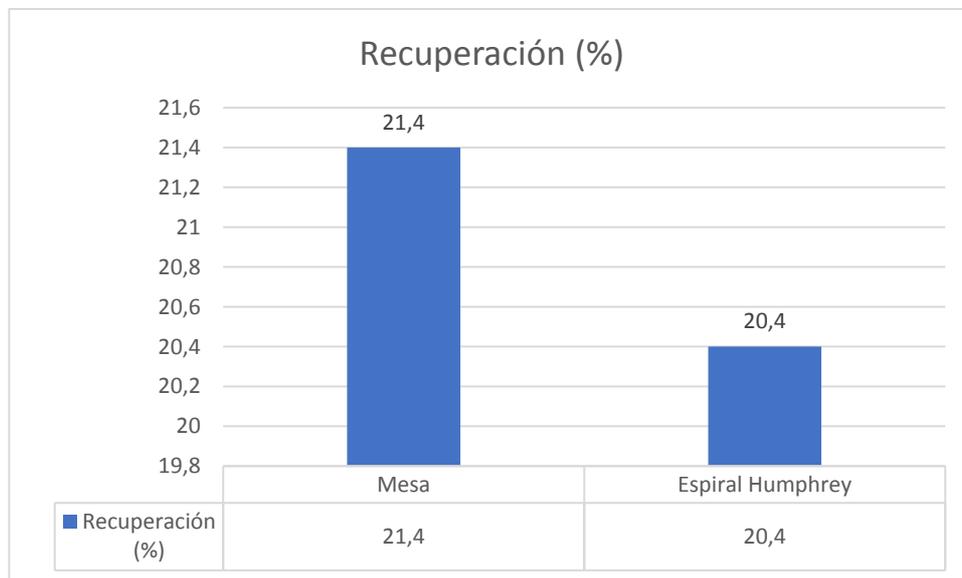


Figura 3.7 Recuperación gravimétrica por equipos

3.4. Flujograma

Para realizar el circuito RCS (ROUGHER CLEANER SCAVENGER) se tomaron en cuenta la muestra B (espiral) y la muestra 4 (mesa vibratoria) debido a que sus recuperaciones metalúrgicas tienen gran similitud y se encuentran entre las más altas; como se están analizando 2 metales se recurrió a realizar un promedio entre las dos recuperaciones de cada equipo concentrador para obtener así un solo dato de recuperación.

# Prueba	Equipo concentrador	Recuperación metalúrgica de Ag (%)	Recuperación metalúrgica de Cu (%)	Promedio
B	Espiral	20.32	20.47	20.4
4	Mesa vibratoria	21.24	21.56	21.4

Tabla 3.7 Experimentos con mayor recuperación metalúrgica

1) FLUJ0GRAMA 1 (MESA; MESA; MESA)

$$R = \frac{R_c \times R_r}{1 - R_r(1 - R_c) - R_s(1 - R_r)}$$

$$R = \frac{0.214 \times 0.214}{1 - 0.214(1 - 0.214) - 0.214(1 - 0.214)}$$

R=6.9%

2) FLUJ0GRAMA 2 (ESPIRAL; ESPIRAL; ESPIRAL)

$$R = \frac{Rc \times Rr}{1 - Rr(1 - Rc) - Rs(1 - Rr)}$$

$$R = \frac{0.204 \times 0.204}{1 - 0.204(1 - 0.204) - 0.204(1 - 0.204)}$$

$$\mathbf{R = 6.16\%}$$

3) FLUJ0GRAMA 3 (MESA; ESPIRAL; MESA)

$$R = \frac{Rc \times Rr}{1 - Rr(1 - Rc) - Rs(1 - Rr)}$$

$$R = \frac{0.204 \times 0.214}{1 - 0.214(1 - 0.204) - 0.214(1 - 0.214)}$$

$$\mathbf{R = 6.6\%}$$

4) FLUJ0GRAMA 4 (ESPIRAL; MESA; MESA)

$$R = \frac{Rc \times Rr}{1 - Rr(1 - Rc) - Rs(1 - Rr)}$$

$$R = \frac{0.214 \times 0.204}{1 - 0.204(1 - 0.214) - 0.214(1 - 0.204)}$$

$$\mathbf{R = 6.52\%}$$

5) FLUJ0GRAMA 5 (MESA-MESA; MESA; ESPIRAL)

$$R = \frac{Rc \times Rr}{1 - Rr(1 - Rc) - Rs(1 - Rr)}$$

$$R = \frac{0.214 \times 0.214}{1 - 0.214(1 - 0.214) - 0.204(1 - 0.214)}$$

$$R = 6.82\%$$

6) FLUJ0GRAMA 6 (MESA-MESA; ESPIRAL; ---)

$$R = \frac{Rc \times Rr}{1 - Rr(1 - Rc) - Rs(1 - Rr)}$$

$$R = \frac{0.204 \times 0.214}{1 - 0.214(1 - 0.204) - 0(1 - 0.214)}$$

$$R = 5.26\%$$

Flujograma 1

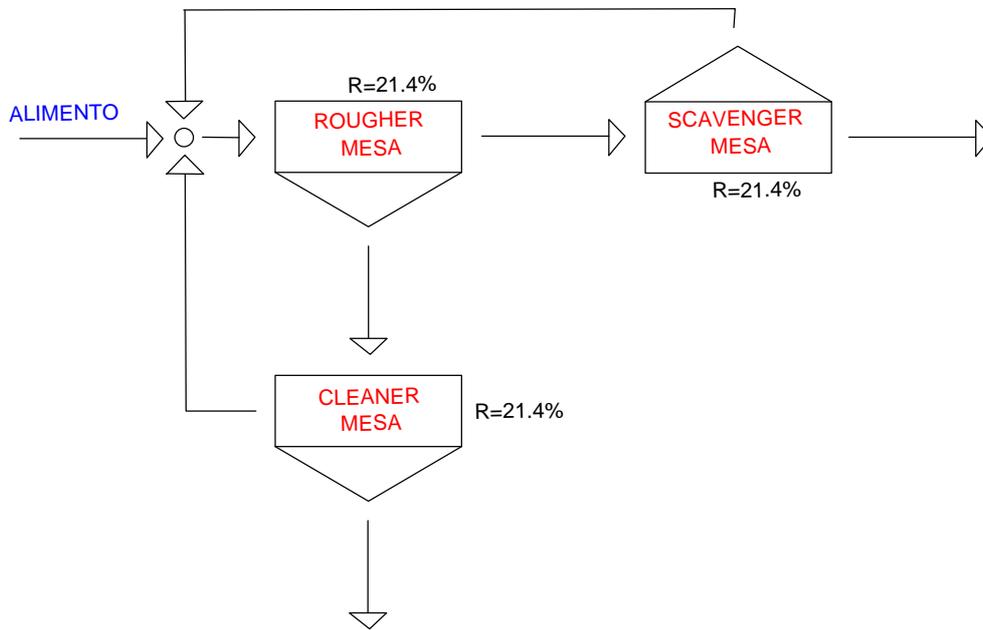


Figura 3.8 Flujograma 1

Flujograma 2

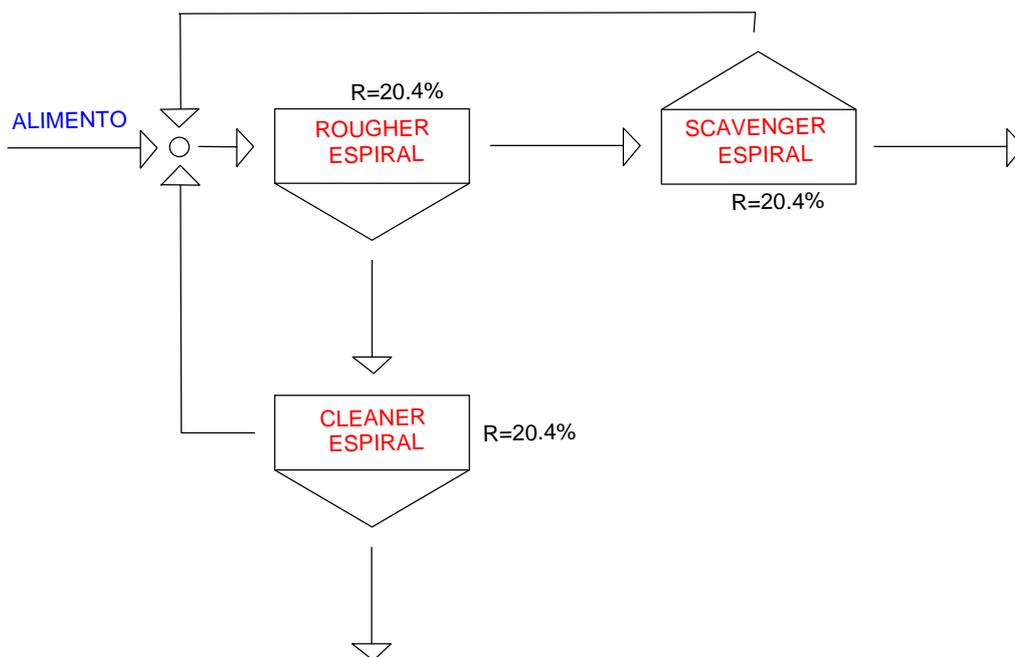


Figura 3.9 Flujograma 2

Flujograma 3

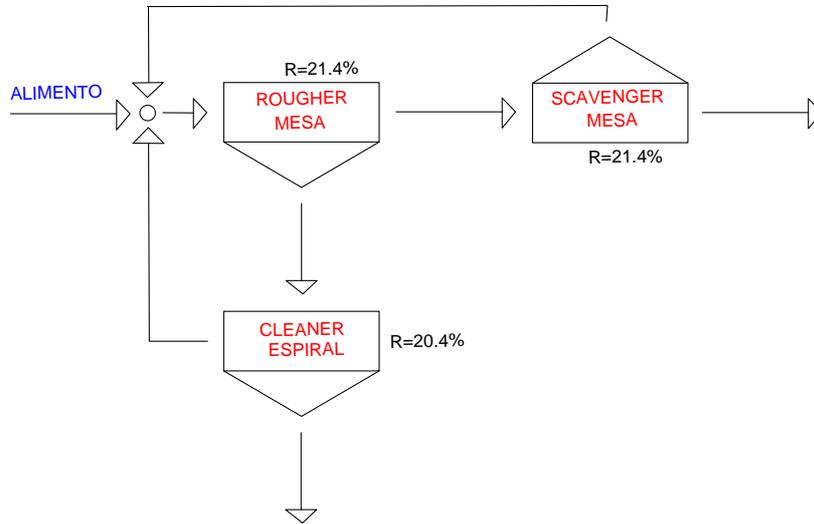


Figura 3.10 Flujograma 3

Flujograma 4

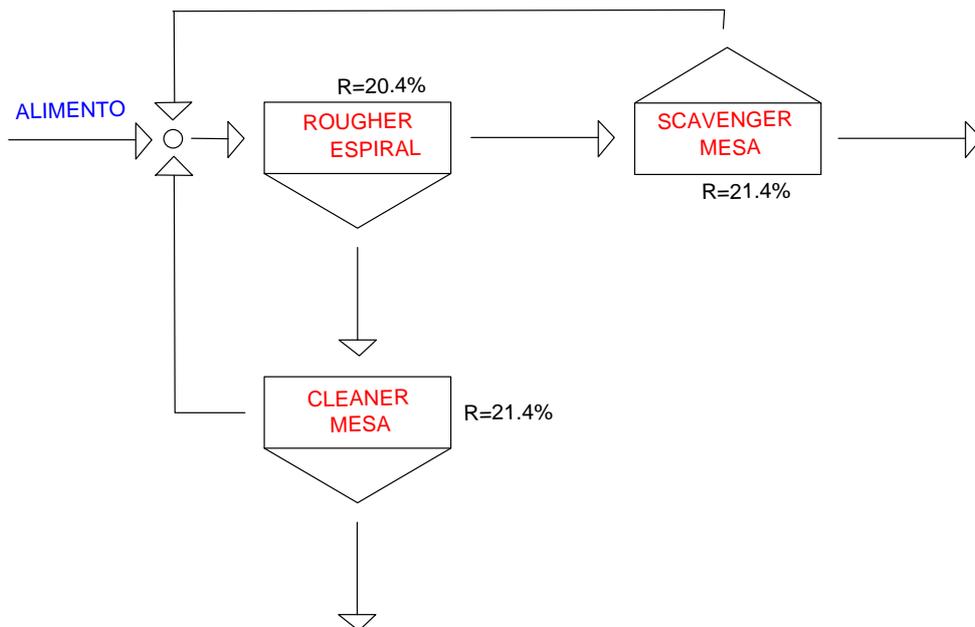


Figura 3.11 Flujograma 4

Flujograma 5

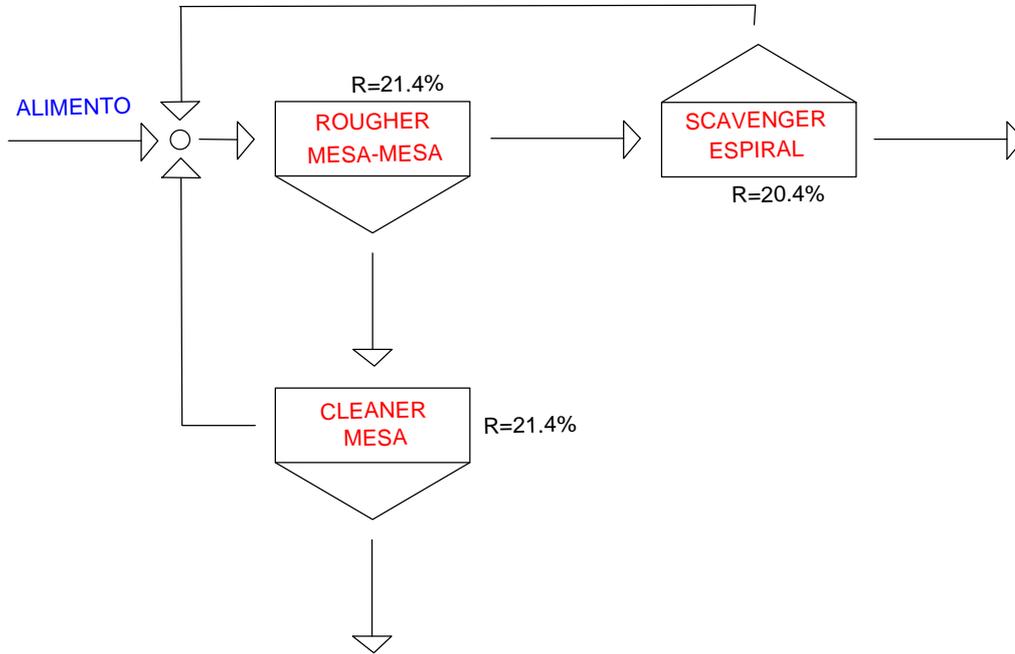


Figura 3.12 Flujograma 5

Flujograma 6

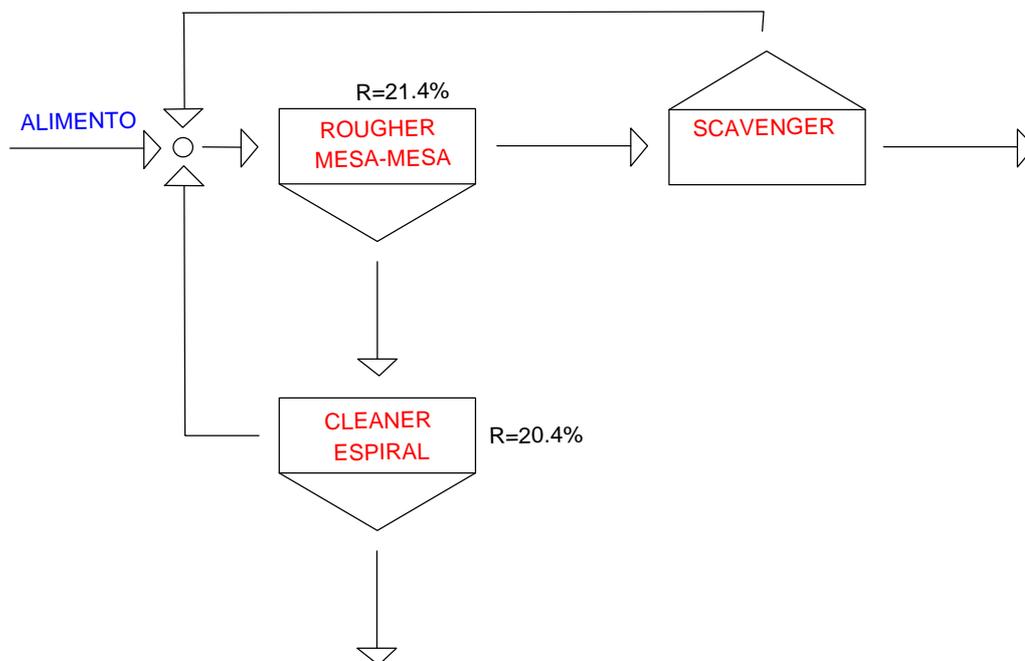


Figura 3.13 Flujograma 6

3.5. Análisis de Resultados de los Flujogramas de concentración gravimétrica

Se expresa en la tabla siguiente los valores de la recuperación de cada circuito creada con la finalidad de mejorar la recuperación combinada de Cu y Ag, cabe mencionar que existen circuitos RCS normales, un equipo en cada fase, y RCS con 2 equipos en paralelo para aumentar únicamente el caudal y más no alterar la recuperación. Notamos que los valores son sumamente bajos de la recuperación global, los valores van de 5.26 a 6.9.

FLUJOGRAMA	ROUGHER	CLEANER	SCAVENGUER	RECUPERACIÓN MESA (%)	RECUPERACIÓN ESPIRAL (%)	RECUPERACIÓN CIRCUITO (%)
1	MESA	MESA	MESA	21.4	20.4	6.9
2	ESPIRAL	ESPIRAL	ESPIRAL	21.4	20.4	6.16
3	MESA	ESPIRAL	MESA	21.4	20.4	6.6
4	ESPIRAL	MESA	MESA	21.4	20.4	6.52
5	MESA-MESA	MESA	ESPIRAL	21.4	20.4	6.82
6	MESA-MESA	ESPIRAL		21.4	20.4	5.26

Tabla 3.8 Recuperaciones de los Flujogramas

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se determinó lo siguiente:

- Se concluye que los equipos de concentración gravimétrica utilizados en esta investigación nos brindan recuperaciones minerales de bajas a regulares, considerando que estos equipos son utilizados para preconcentración por su bajo grado de enriquecimiento, como lo dice Pavez en su investigación de tratamiento mineral, y no usualmente para la recuperación de minerales residuales; como en este caso de estudio que el material de alimento procede de una relavera.
- Se deduce que la recuperación es ineficiente tanto para Cu y Ag por la baja recuperación obtenida, esto se presume debido a que el material estéril que acompaña al mineral de interés tiene una densidad semejante por lo que la concentración no resulta ser muy buena, o también, puede deberse a que la granulometría del Cu o Ag es sumamente pequeña a comparación de la ganga, por lo que, tienden a tener el mismo comportamiento y a mezclarse tanto mineral como estéril y no brindar una buena separación.
- En el espiral Humphrey al concluir con los experimentos se alcanzó la recuperación máxima para Cu y Ag de 20.4% (promedio de los 2 metales) en la prueba “B” la cual se realizó con los siguientes parámetros operacionales como son: 10% de fracción de sólidos y un caudal de alimento de 68.9 l/min.
- Al finalizar con los experimentos, la recuperación promedio en la mesa vibratoria resulta en 21.4% para Cu y Ag efectuando el proceso con una fracción de sólidos de 10%, inclinación longitudinal de 1° y un caudal de lavado de 14 l/min como parámetros operacionales.

- El sistema RCS (Rouger. Cleaner, Scavenger) analizado como alternativa para el tratamiento de relaves no presenta una mejora en la recuperación de Cu y Ag, debido a que la recuperación que brinda cada equipo es baja (21.4% mesa vibratoria, 20.4% espiral Humphrey). Se realizó el diseño de varios circuitos RCS obteniendo como resultado un proceso ineficiente con valores de 5.2% a 6.9% como recuperación global.

Por lo cual no se recomienda ningún circuito RCS, únicamente un proceso directo de recuperación.

- En la mesa vibratoria con los siguientes parámetros operacionales: 10 % de fracción de sólidos, 14 l/min de caudal de lavado y 2° de inclinación longitudinal; se alcanzó la máxima recuperación de todo el experimento dando como resultado una recuperación metalúrgica de 30.57 % para Ag y de 23.85 % para Cu.
- Finalmente, la recuperación en conjunto de Cu y Ag en la mesa vibratoria es de 21.4% y en el caso de la espiral Humphrey es de 20.4 %, dicha diferencia al ser analizada no presenta un valor significativo. Por lo que la mejor alternativa para el tratamiento de relaves resulta ser la espiral Humphrey por su fácil mecanización, reducida mano de obra, mejores características operacionales y reducidos consumos de agua en sus procesos.

RECOMENDACIONES

- De acuerdo con Rodríguez en su investigación titulada “Concentración gravimétrica de minerales Auríferos” que toma en cuenta como criterio operacional evitar una distribución granulométrica muy amplia, se recomienda trabajar con un material de granulometría homogénea, debido a que si el material proveniente es seco tiende a aglomerarse presentando inconvenientes para la clasificación gravimétrica. Por lo que se procede a una trituración y molienda de ser necesaria, únicamente para reestablecer la granulometría original del material.
- Para trabajar con el material de relave de la empresa minera Excelmoro S.A en el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay se recomienda emplear pulpas con una fracción de sólidos no mayor a un 20% ya que el material presenta una alta densidad y puede provocar inconvenientes en la bomba de distribución de la pulpa como: obstrucción o un taponamiento total.
Además, el material por el alto porcentaje de fracción de sólidos aumenta su viscosidad y tiende a comportarse como un sólido.
- En la mesa vibratoria de la Universidad del Azuay se sugiere utilizar caudales bajos de alimento en pulpa para el proceso de concentración, debido a que es un equipo práctico experimental de bajas proporciones por lo que puede llegar a superar la capacidad de acogida creando un proceso ineficiente.
- Para mejorar el trabajo en el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay se aconseja construir un sistema directo de ingreso de agua, específicamente para el lavado del material en la mesa vibratoria debido a que el sistema existente es compartido con el resto del laboratorio, lo que provoca inconvenientes al no permitir establecer caudales estables de lavado.

- El circuito RCS (Rouger, Cleaner, Scavenger) no es apto para este tipo de experimento, debido a que el sistema es eficiente cuando se realiza con recuperaciones superiores al 50%. Se aconseja no utilizarlo pues la recuperación global baja en comparación con la recuperación obtenida en un proceso único de concentración.
- En el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay se sugiere crear un sistema de drenaje adecuado donde pueda circular toda el agua resultante de los procesos de concentración ya que en la actualidad desalojar esta agua se vuelve tedioso debido a que se realiza manualmente.
- Al concluir que el proceso de concentración gravimétrica en espiral y mesa vibratoria no es eficiente por las bajas recuperaciones obtenidas, se recomienda realizar el proceso de concentración buscando nuevas alternativas: una de estas puede ser la utilización de clasificadores centrífugos o la separación por medios densos.
- Finalmente, se recomienda realizar el experimento de clasificación gravimétrica de relaves considerando un mayor número de metales de interés económico como por ejemplo el Au y así ver la influencia que tiene este metal en el proceso.

Realizar el experimento considerando los siguientes metales: Au, Cu y Ag.

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.).

- Almaguer, R. S. (2007). *Desarrollo del Proceso de Tratamiento para un Mineral de Alta Ley de Oro (46 g/ton)*. Departamento de Ingeniería en Minas, Metalurgia y Geología.
- AREQUIPA, G. R. (2016). "TECNOLOGÍA LIMPIA PARA LA PEQUEÑA MINERÍA Y MINERÍA ARTESANAL RECUPERACIÓN DEL ORO". AREQUIPA. Obtenido de <https://www.plataformaintegraldemineria.org/sites/default/files/2018-11/Tecnolog%C3%ADa%20limpia%20para%20la%20peque%C3%B1a%20miner%C3%ADa%20y%20miner%C3%ADa%20artesanal%20recuperaci%C3%B3n%20del%20oro.pdf>
- Arturo, P. V. (2007). *MESA VIBRADORA PARA CONCENTRACIÓN DE METALES AURÍFEROS*. Cuzco. Obtenido de <http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/05/05-33.pdf>
- Asanza, M. F., & Merizalde, J. O. (2016). *Diseño y construcción de una mesa concentradora para la optimización del proceso de extracción de oro en una empresa minera de Zaruma*. Guayaquil .
- Brewis, T. (Octubre 1995). *Separación por Gravedad*.
- CARBAJAL MARTÍNEZ, C. D., & CHÁVEZ BASURCO, A. D. (2015). *ESTUDIO DEL CONCENTRADOR GRAVIMETRICO HELICODAL HECHO CON FIBRA DE VIDRIO Y SUS PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO* . Arequipa- Peru .
- Choque, M. G. (2017). *ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE ORO ALUVIAL EN CONCENTRADOR FALCON EN LA COOPERATIVA MINERA LIMATA ANANEA - PUNO*. TACNA – PERÚ.
- Delgado, J. M. (Zaruma). "Experiencia piloto en la remediación y mitigación de sulfuros y la generación de AMD en elrelaveras del distrito minero de Zaruma-Potovelo". 2016.
- Falcón, M. F. (2017). *DEPARTAMENTO DE DEPÓSITOS DE RELAVES*. Chile.
- Francisco, Y. E. (2014). *INFORME DE EXPERIENCIA PROFESIONAL EN LA MINA CORPORACION MINERA SANTA TERESA-PUNO*. AREQUIPA-PERU.
- Fuente, L. (2015). *Procesos de concentración*. Obtenido de http://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5557/mod_resource/content/1/Tema_9_-_Concentracion_por_Gravedad_II_-_Lamina_Fluente.pdf
- Israel, C. C. (2014). *Recuperación de Oro por gravimetría mineral proveniente del distrito minero Nambija "condominio sur"*. Loja- Ecuador.
- López, P. (2003). *La Minería y su Pasivo Ambiental*. Chile. Obtenido de http://www.terram.cl/descargar/recursos_naturales/mineria/app_-_analisis_de_politicas_publicas/APP-24-La-mineria-y-su-pasivo-ambiental.pdf
- MARTINEZ, C. D. (2015). *ESTUDIO DEL CONCENTRADOR GRAVIMETRICO HELICODAL HECHO CON FIBRA DE VIDRIO Y SUS PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO*. Arequipa- Peru .
- Mignova, J. A. (2017). Guía para el manejo responsable y alternativas de eliminación del mercurio en ambientes de trabajo del sector minero. *Alianza por la minería responsable* , 13.

- Palma, J. G. (2017). *Evolución del Manejo de Relaves en Chile*. Santiago- Chile.
- Pavez, D. O. (2008). *Concentracion de minerales II*. Atacama.
- PINEDA, S. L. (2013). "ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DE UNA PLANTA GRAVIMÉTRICA DE CONCENTRACIÓN DE ORO ALUVIAL EN TINGO MARÍA". PUNO- PERU. Obtenido de http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2722/Llampi_Pineda_Sa%C3%BAI_Lucio.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Prado, J. D. (2017). *Parámetros de operación del separador JIG para material tomado de un placer aurífero*. Universidad del Azuay, Cuenca- Ecuador.
- Rey, A. L. (2015). *Tratamientos de relaves mineros contaminados con plantación de gramíneas (Kikuyo) para convertirlos en áreas verdes en las minas de la región central del Perú*. Huancayo-Perú.
- River, C. (2017). *Movimiento de partículas y acción de rifles en una mesa concentradora*. Cuenca.
- Rodriguez, H. I. (2007). *ESTUDIO DE LA CONCENTRACION GRAVIMETRICA DE MINERALES AURIFEROS*. Santiago de Calí.
- Rúa, O. B., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2008). *Concentracion de minerales*. Colombia.
- Valdebenito, O. (2016). *Residuos profesional*. Chile. Obtenido de <https://www.residuosprofesional.com/chile-minicentral-electrica-relaves/>
- Valdivieso, D. A., Amaya, I. A., & Rangel, I. S. (1999). *CONCENTRACION GRAVIMETRICA CENTRIFUGADE ORO Y PLATA. SU IMPLEMENTACION EN EL CIRCUITO DE MOLIENDA DE MINERA EL PILON*. Acapulco .
- Vera, D. A., & Barreto, J. A. (2017). *Recuperación de oro en minerales sulfurados de baja ley en la provincia de Casma*. Lima- Perú. Obtenido de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/6475/Julca_vd.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- VIIICAPOMA JUAO, J. R., & CHAVEZ POMA, Z. (2012). "PRUEBA t1 EXPERIMENTALES A NIVEL DE LABORATORIO DE CONCENTRACIÓN GRAVIMETRICA Y FLOTACIÓN DE MINERALES DE ORO EN LA PLANTA CONCENTRADORA "CASELITA" EN CONDOROMA - CUZCO" . HUANCAYO- PERÚ.
- Villanueva, A. J. (2007). *Manejo ambiental relaves*. Lima- Peru. Obtenido de http://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/cybertesis/2117/Rojas_va.pdf?sequence=1&isAllowed=y

ANEXOS



RUC: 0703460188001
Telf. : 0991518767 - 0986367332
E-mail: goldenlab@hotmail.es
www.goldenlab.com.ec

Solicitante: Cristian Fajardo
Método: E.F.+AA (Ensayo al fuego y lectura en Absorción Atómica)
Fecha de reporte: 23/08/2019

Reporte N° 26607

#	CÓDIGO	Fecha Muestreo	Au-g/TM	Ag-g/TM	%Cu	%Pb	%Zn	%As	%Sb	%H
			Oro-total	Plata-total	Cobre	Plomo	Zinc	Arsénico	Antimonio	humedad
			E.F	E.F	AA	AA	AA	EDL	AA	AA
1	A1	21/08/2019	3,53	16,73	0,32					
2	B1	21/08/2019	7,27	17,07	0,31					
3	C1	21/08/2019	4,13	12,07	0,30					
4	D1	21/08/2019	7,00	16,00	0,37					
5	E1	21/08/2019	7,00	14,60	0,35					
6	F1	21/08/2019	6,67	21,53	0,42					
7	Muestra1	21/08/2019	5,10	22,80	0,58					
8	Muestra2	21/08/2019	15,60	26,40	0,56					
9	Muestra3	21/08/2019	8,60	18,40	0,51					
10	Muestra4	21/08/2019	4,90	29,50	0,54					
11	Muestra5	21/08/2019	6,90	52,60	0,74					
12	Muestra6	21/08/2019	27,40	58,50	0,72					

Anexo 1 Análisis de laboratorio de Au, Ag y Cu del Concentrado final de la mesa vibratoria y de la espiral Humphrey.



RUC: 0703460188001
Telf. : 0991518767 - 0986367332
E-mail: goldenlab@hotmail.es
www.goldenlab.com.ec

Solicitante: Andrés Coronel
Método: E.F.+AA (Ensayo al fuego y lectura en Absorción Atómica)
Fecha de reporte: 05/06/2019

Reporte N° 23034

#	CÓDIGO	Fecha Muestreo	Au-g/TM	Ag-g/TM	%Cu	%Pb	%Zn	%As	%Fe	%H
			Oro-total	Plata-total	Cobre	Plomo	Zinc	Arsénico	Hierro	humedad
			E.F	E.F	AA	AA	AA	EDL	AA	AA
1	Relave	04/06/2019	0,33	6,10	0,11	0,03	0,09		3,18	

Ing. Químico Julio Rigchag G.
Reg. SENESCYT 1011-08-84090

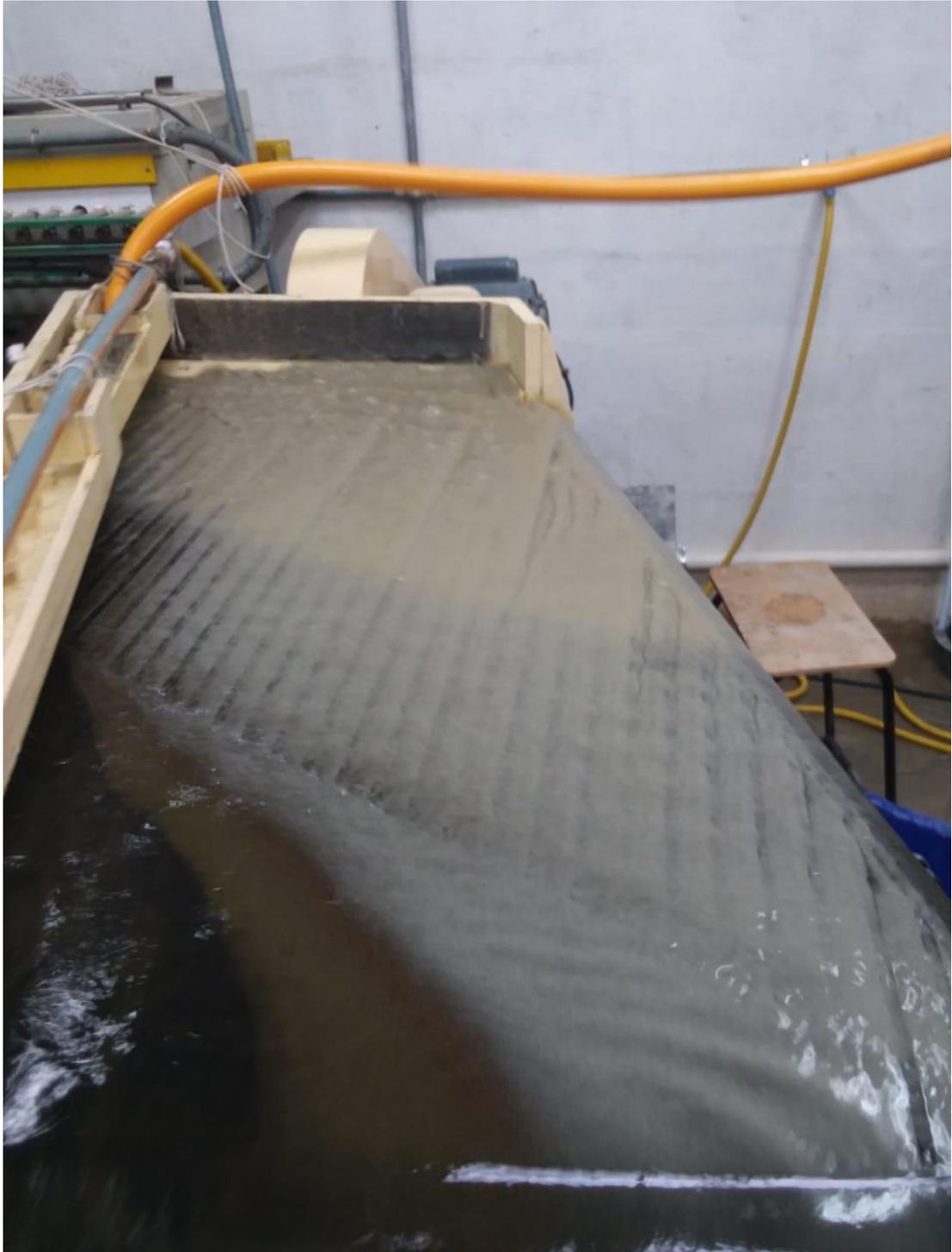


Dirección: Av. Principal Portovelo-Piñas, A pocos metros del Puente de la Florida, Junto a la chatarrera.

Anexo 2 Análisis de laboratorio de Au, Ag, Cu, Pb, Zn y Fe del relave de alimento.



Anexo 3 Espiral Humphrey de la Universidad del Azuay



Anexo 4 Mesa vibratoria de la Universidad del Azuay