



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

**“Parámetros de operación del separador JIG para material
tomado de un placer aurífero”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

JUAN DIEGO AVILA PRADO

Director:

ERNESTO PATRICIO FEIJOÓ CALLE

CUENCA, ECUADOR

2017

DEDICATORIA

Este trabajo dedico a mi familia que con su gran ejemplo de unidad me han educado y han hecho posible este sueño, en especial a mi madre y abuelos que jamás me permitieron dar un paso atrás. También lo dedico a mis hermanos que me motivan para ser ejemplo día a día. Por último, a mis amigos, compañeros y maestros, los cuales se cruzaron en mi camino dejando huellas y conocimientos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por sobre todas las cosas. Agradezco a la Universidad del Azuay porque a través de sus docentes pude adquirir conocimientos que me llevarán a desempeñarme como un profesional formado con valores éticos y morales. Al ingeniero Patricio Feijoo, director de tesis, por el tiempo brindado para que éste trabajo sea realizado con éxito. Agradezco a cada uno de mis compañeros que compartieron aulas, criterios y conocimientos conmigo.

Por último, un agradecimiento a toda mi familia que me brindaron su apoyo para dar este gran paso.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii

INTRODUCCIÓN.....	1
--------------------------	----------

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO.....	3
---------------------------------------	----------

1.1 Concentración gravimétrica.....	3
1.2 Fundamentos.....	4
1.2.1 Centrifugación.....	4
1.2.2 Tamaño de liberación.....	4
1.2.3 Razones de sedimentación.....	4
1.2.4 Criterios de concentración (C.C).....	5
1.3 Métodos gravimétricos.....	6
1.3.1 Equipos de concentración.....	7
1.3.1.1 Para medios densos.....	7
1.3.1.2 En corrientes.....	9
1.4 Descripción del experimento.....	12
1.5 El JIG y su principio de funcionamiento.....	12
1.5.1 Tipos de JIG.....	13
1.5.2 Elementos constitutivos de un JIG.....	16
1.5.3 Variables que intervienen en el cribado hidráulico (jigging).....	16
1.5.4 Efectos para la estratificación mineral en el JIG.....	17
1.5.5 Optimización del equipo.....	18
1.6 Arenas aluviales.....	18

1.6.1 Placer aurífero.....	19
----------------------------	----

CAPÍTULO 2: CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....20

2.1 Descripción del material.....	20
2.2 Geología.....	21
2.2.1 Geología regional.....	21
2.2.2 Geología local.....	21
2.3 Recolección de muestras.....	22
2.4 Cuarteo de muestras.....	24
2.5 Granulometría.....	25
2.5.1 Clasificación por tamaños.....	25
2.5.2 Curva granulométrica.....	26
2.6 Mineralogía.....	27

CAPÍTULO 3: PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN29

3.1 Adecuación del JIG de laboratorio.....	29
3.2 Análisis de muestras de entrada.....	30
3.3 Aspectos generales.....	31
3.4 Determinación del tamaño máximo del alimento.....	31
3.5 Determinación de los factores y variables operacionales.....	33
3.5.1 Abertura del tamiz.....	33
3.5.2 Lecho del JIG.....	34
3.5.3 Cantidad de agua.....	35
3.5.4 Intensidad de pistonada.....	35
3.6 Procesamiento de las muestras en el equipo.....	35
3.7 Observación de posibles problemas.....	37
3.8 Ajustes.....	37

CAPÍTULO 4: CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....38

4.1 Cálculos y resultados.....	38
4.1.1 Criterio de concentración.....	38

4.1.2 Efectividad del JIG (índices metalúrgicos).....	40
4.1.3 Tenor en colas.....	42
4.2 Determinar los tiempos de procesamiento.....	44
4.3 Cálculo de energía y costos.....	44
4.4 Analizar si el equipo puede ajustar sus variables para procesar muestras futuras.....	45
4.5 Análisis de resultados.....	46
 CONCLUSIONES.....	47
 RECOMENDACIONES.....	49
 BIBLIOGRAFÍA.....	50
 ANEXOS.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Aplicabilidad de la concentración gravimétrica según su criterio de concentración.....	5
Figura 1.2 Características de los métodos de separación por corrientes.....	7
Figura 1.3 Representación sistemática del separador en medio denso del tipo tambor...	8
Figura 1.4 Representación sistemática del separador en medio denso del tipo ciclón.....	8
Figura 1.5 JIG tipo Denver.....	9
Figura 1.6 Mesa vibratoria.....	10
Figura 1.7 Espiral.....	10
Figura 1.8 Canaleta.....	11
Figura 1.9 Concentrador KNELSON.....	11
Figura 1.10 JIG Harz.....	14
Figura 1.11 Esquema de funcionamiento del JIG Denver con la válvula cerrada.....	15
Figura 1.12 Esquema de funcionamiento del JIG Denver con la válvula abierta.....	15
 Figura 2.1 Material tomado in situ.....	 20
Figura 2.2 Geología regional del área de estudio.....	21
Figura 2.3 Perfil estratigráfico para la geología local.....	22
Figura 2.4 Mapa de ubicación del placer aurífero.....	22
Figura 2.5 Concesión donde se tomaron las muestras.....	23
Figura 2.6 Recolección del material.....	23
Figura 2.7 Cuarteo manual de las muestras.....	24
 Figura 3.1 Estado del JIG antes de su adecuación.....	 29
Figura 3.2 Estado actual del JIG del laboratorio de ingeniería en minas.....	30
Figura 3.3 Verificación de partículas de oro en las muestras a procesar.....	30
Figura 3.4 Rango efectivo de aplicación de técnicas convencionales para el procesamiento de minerales.....	32
Figura 3.5 Muestras listas para el procesamiento en el JIG.....	32
Figura 3.6 Tamiz del JIG.....	33

Figura 3.7 Lecho del JIG.....	34
Figura 3.8 Proceso de concentración en el JIG.....	36
Figura 3.9 Presencia de partículas de oro en el material pre concentrado.....	36
Figura 4.1 Minerales pesados obtenidos en el proceso de jigging.....	38
Figura 4.2 Cálculo de la densidad de los minerales livianos.....	39
Figura 4.3 Abaco de criterio de concentración según el material de estudio.....	40
Figura 4.4 Esquema general de separación en un concentrador detallando la corriente de entrada (alimento), y las corrientes de salidas (concentrado y colas).....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Criterio de concentración de algunos minerales comunes, concentrados mediante separación gravimétrica, de una ganga de densidad de 2,65 gr/cm.....	6
Tabla 2.1 Tamaños de los componentes de la muestra obtenidos en el laboratorio de suelos.....	25
Tabla 2.2 Valores del diámetro de las partículas y del porcentaje que pasa.....	26
Tabla 2.3 Cálculo de la ley del material.....	28
Tabla 4.1 Efectos operacionales según algunas variables que intervienen en el jigging.....	41

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Análisis químico del alimento.....	52
Anexo 2: Análisis químico del concentrado.....	53
Anexo 3: Manual de operación del JIG del laboratorio de ingeniería en minas.....	54

PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SEPARADOR JIG PARA MATERIAL TOMADO DE UN PLACER AURÍFERO

RESUMEN

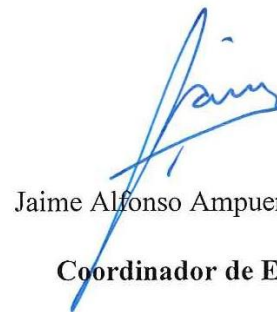
Los procesos mineros de recuperación han tenido grandes progresos y rendimientos en las últimas décadas, pero siempre tendiendo a la optimización de las operaciones mediante el uso de nuevos equipos que reduzcan costos, tiempo y que permitan analizar y modificar algunas variables con las cuales lleguemos a obtener procesos técnicos de calidad.

Este trabajo busca optimizar los procesos de concentración mediante un equipo del laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas denominado JIG, infiriendo en sus variables operativas, con el objetivo de que esta prueba arroje resultados confiables luego de procesar muestras provenientes de un placer aurífero.

Palabras clave: Recuperación, concentración, procesos, variables, parámetros, JIG.



Ernesto Patricio Feijóo Calle
Director del Trabajo de Titulación



Jaime Alfonso Ampuero Franco
Coordinador de Escuela



Juan Diego Avila Prado

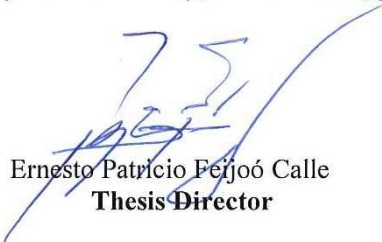
Autor

**OPERATING PARAMETERS OF A JIG SEPARATOR USED FOR
MATERIALS TAKEN FROM A GOLD PLACER**

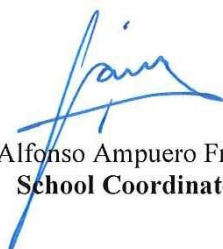
ABSTRACT

Mining recovery processes have had great progress and yields in the last decades; but always leading towards the optimization of operations through the use of new equipment that reduces costs, time and allows analyzing and modifying some variables with which it is possible to obtain quality technical processes. This work aimed to optimize the processes of concentration by means of equipment known JIG from the School of Mining Engineering laboratory, inferring on their operational variables in order to obtain reliable results after processing samples from a gold placer.

Keywords: recovery, concentration, processes, variables, parameters, JIG



Ernesto Patricio Feijóo Calle
Thesis Director



Jaime Alfonso Ampuero Franco
School Coordinator



Juan Diego Avila Prado
Author



UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by
Lic. Lourdes Crespo

Avila Prado Juan Diego

Trabajo de Titulación

Ing. Ernesto Patricio Feijoó Calle

Noviembre, 2017

PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SEPARADOR JIG PARA MATERIAL TOMADO DE UN PLACER AURÍFERO

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto técnico - práctico trata de optimizar el separador de minerales pesados llamado “JIG” que posee la escuela de ingeniería en minas y a su vez determinar los parámetros y variables con los que esta máquina funciona correctamente.

El motivo de la investigación en este proyecto de tesis es determinar las variables que intervienen en el proceso de concentración mediante el JIG, a la vez de evaluar el gasto energético de esta máquina separadora de minerales. Es decir, profundizar nuestro conocimiento de este equipo industrial que optimiza variables como tiempo y dinero, a su vez que es más fácil de ajustarlo, manejarlo y repararlo.

En los procesos mineros de recuperación de minerales, ciertos factores como el costo y el tiempo resultan un problema a la hora de elegir un equipo de separación o concentración que permita obtener el material deseado. En la actualidad existen varios procesos que permiten a la industria minera concentrar minerales, pero éstos conllevan grandes requerimientos de energía y altos tiempos de operación.

Es por ello que las posibilidades de uso del JIG en la minería son amplias. Particularmente en la minería aurífera puede ser utilizado tanto en la primaria (vetas) como en la secundaria (aluvial). La experiencia ha demostrado que resulta muy eficiente en la recuperación de oro laminar y granular, donde difícilmente es igualado por otros equipos gravimétricos. Además, es un equipo que brinda las posibilidades de manejar variables y

factores tanto del equipo, como del material a procesar. Por otro lado, la utilización del mercurio en los procesos gravimétricos de separación de minerales conlleva un problema medio ambiental sobre todo en la pequeña minería y minería artesanal, por lo que el uso de esta máquina significaría una potencial alternativa en la industria minera.

Es decir, con este proyecto buscamos una evaluación del método de concentración de minerales mediante el JIG, pretendiendo adecuar físicamente éste equipo para su correcto funcionamiento y determinando sus parámetros operacionales óptimos de acuerdo a muestras tomadas en un placer aurífero, y que puedan ser ajustados en función de sus variables para muestras futuras.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1. Concentración gravimétrica

La concentración gravimétrica es la operación realizada después de que se extrae el material de la mina; es un procedimiento de separación sólido – líquido de acuerdo al peso específico que presenta dicho material. Es decir, la concentración por gravimetría involucra la suspensión de las partículas en un fluido como el agua y la separación de las mismas de acuerdo a la diferencia notable de sus pesos específicos. Esto es llevado a cabo en base a movimientos horizontales o verticales en los cuales se va separando el material más pesado (como en muchos casos el oro), por lo que este proceso es ideal para la industria minera aurífera especialmente de yacimientos aluviales.

En la concentración por gravedad, la finalidad de la operación, es la concentración o segregación de partículas de una especie en una fracción relativamente pequeña de la cantidad total de la mezcla tratada. (Solís Carrión & Torres Lupercio, 1994).

En la actualidad, existen técnicas modernas y prácticas con las cuales podemos llevar a cabo una concentración gravimétrica y que incluyen máquinas que utilizan la fuerza centrífuga para lograr separar partículas de diferentes pesos específicos; concentradores centrífugos, separadores de gravedad múltiples y ciertos JIGS son algunos de los equipos que realizan esta operación.

Por otro lado, la concentración puede llevarse a cabo de manera manual o mecanizada, aunque hoy por hoy existen sistemas mixtos como por ejemplo el JIG, que al principio de su uso era netamente manual, mientras que ahora podemos encontrarlo mecanizado parcialmente; su proceso se realizaba colocando el material dentro del agua y sedimentando el mineral de interés con un movimiento pulsatorio.

Cabe recalcar que en un proceso de concentración gravimétrico tendremos dos productos: el concentrado, donde se encuentra el material valioso y que está listo para llevar al siguiente proceso para obtener el metal (en el caso de arenas metálicas), y las colas que contiene todo el material desechado o que no es de interés.

1.2. Fundamentos

Los métodos de concentración por gravimetría llevan a cabo un efecto de suspensión ya sea total o parcial de las partículas del material; y la separación sólidos – líquidos se efectúa por el movimiento de dichas partículas y por el medio en el que éstas se encuentran, que por lo general es agua. Algunos fundamentos son claves en este proceso ya que deben cumplir ciertas condiciones para que la operación sea óptima.

1.2.1. Centrifugación

Es una práctica que logra la separación de las partículas de un material enfocándose en la distinta velocidad de desplazamiento de éstas en un medio líquido al ser sometidas a una fuerza centrífuga.

Cuando llevamos a cabo este proceso (ya no en el material solamente sino la solución como tal), se rompe la homogeneidad y se produce la separación del soluto y del disolvente. Las primeras partículas en sedimentar son las de mayor masa. Es decir, los procesos de separación gravimétricos pueden verse acelerados y optimizados mediante el uso de un equipo centrífugo.

1.2.2. Tamaño de liberación

Para todas las formas de concentración por gravedad es un requisito previo triturar el material a un tamaño suficientemente fino para que las partículas sean en su mayor parte de una sola especie mineral. Quedan siempre en alguna proporción partículas trabadas o granos de tamaño mediano, cuyo efecto es diluir el concentrado o enriquecer el desecho. (Solís Carrión & Torres Lupercio, 1994).

Dicho esto entonces, el tamaño o “grado” de liberación es un término netamente cuantitativo que nos indica la capacidad de obtener partículas minerales libres tras el proceso de molienda.

1.2.3. Razones de sedimentación

Es la razón del diámetro de la partícula ligera respecto al diámetro de la partícula pesada que se está sedimentando igualmente con ella en condiciones específicas de balanceo hidráulico. Las razones aumentan a medida que las velocidades de sedimentación se convierten en movimientos turbulentos, dejando de ser movimientos viscosos.

1.2.4. Criterios de concentración (C.C)

El criterio a tomar en cuenta para la determinación de cual y qué clase de separación es posible en un caso particular, es la gravedad, y se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$C.C = \frac{D_h - D_f}{D_l - D_f}$$

Donde:

- D_h = Densidad relativa o gravedad específica del mineral pesado en kg/m³.
- D_l = Densidad relativa o gravedad específica del mineral liviano en kg/m³.
- D_f = Densidad relativa o gravedad específica del medio o fluido en kg/m³.

Según Taggart, si esta razón es mayor a 2,5 ya sea positivo o negativo, la separación gravimétrica será relativamente fácil para material por debajo de los 75 μ m (tamaños hasta 200 mallas). A medida que esta razón disminuye, la eficiencia de la separación también disminuye; En valores de 1,75 la concentración será posible para material por debajo de los 150 μ m (entre 65 a 100 mallas). En valores de 1,5 la concentración suele ser muy difícil y valores iguales a 1,25 se consideran la razón límite inferior para la separación húmeda por gravimetría.

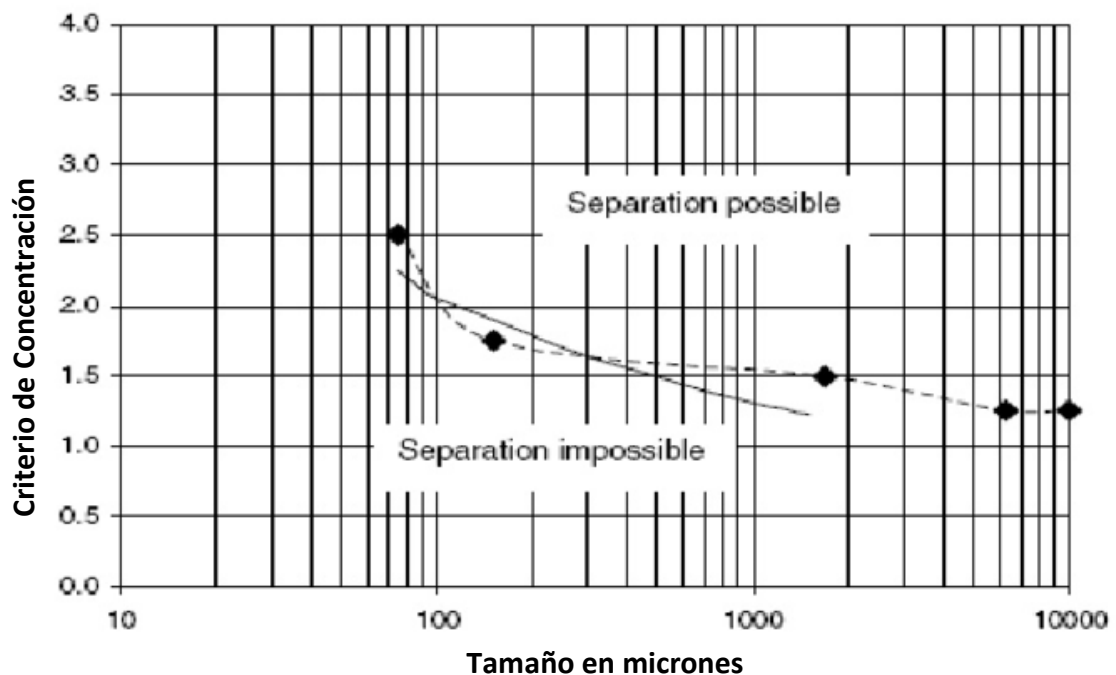


Figura 1.1: Aplicabilidad de la concentración gravimétrica según su criterio de concentración.

Fuente: (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2012).

Tabla 1.1: Criterio de concentración de algunos minerales comunes, concentrados mediante separación gravimétrica, de una ganga de densidad de 2.65 gr/cm.

MINERAL	FLUIDO	C.C
Oro	Agua	10,3
Oro	Aire	6,8
Casiterita	Agua	3,5
Carbón	Agua	3,4
Hematita	Agua	2,5

Fuente: (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2012)

1.3. Métodos gravimétricos

Los métodos de concentración gravimétrica se clasifican en dos tipos:

- Métodos de concentración en medios densos: En este método el medio en el cual se produce la separación tiene una densidad intermedia con respecto a los pesos específicos de las materiales que se planean separar. Existen 2 tipos de separación en este método: separación estática y separación dinámica.

Para efectuar este mecanismo de separación, el material ya seleccionado y tratado se coloca en un recipiente que ya posee el líquido; el producto más ligero (el que tiende a flotar), se hace rebosar por desplazamiento del material entrante (y del medio circulante), mientras que el más pesado (el que tiende a hundirse), se saca por separado desde el fondo del recipiente. Es por ello que a este método también se lo llama “sistema flotación – hundimiento”.

- Métodos de concentración en corrientes: En este método la densidad del medio es inferior a aquellas que de las especies que se requieren separar. Existen varios tipos de separación en corrientes: corrientes verticales, corrientes longitudinales, corrientes oscilatorias y corrientes centrífugas. Cabe recalcar que la concentración en corrientes verticales confiere características propias a los efectos en el proceso por lo que es la separación más importante, y también utiliza al JIG como equipo principal de concentración.

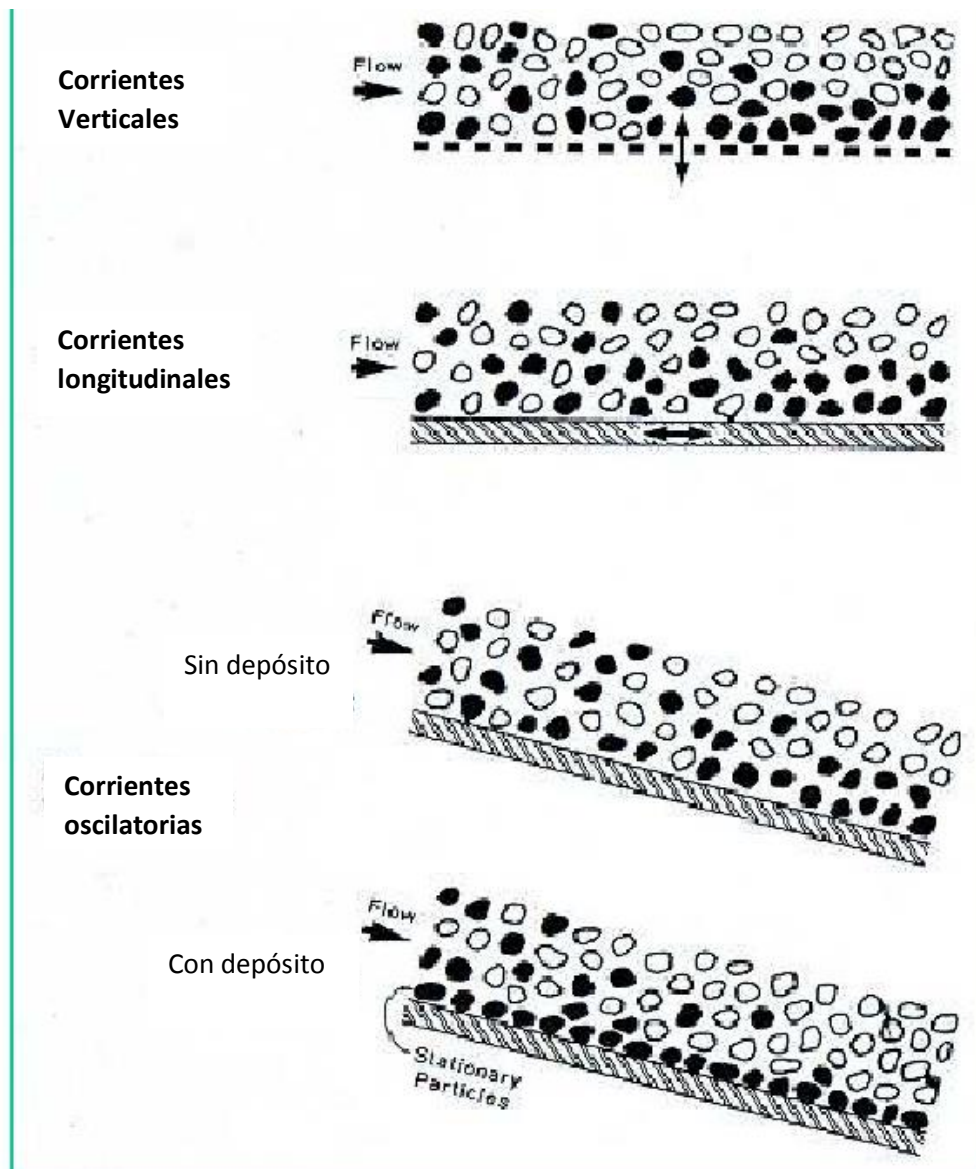


Figura 1.2: Características de los métodos de separación por corrientes.

Fuente: (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2012).

1.3.1. Equipos de concentración

A continuación observaremos todos los equipos gravimétricos de concentración según su tipo de separación:

1.3.1.1. Para medios densos

- a. **Separación estática:** Separadores en medio denso del tipo tambor (fig. 0.3), Separadores de conos, separadores en estanques y vasos.
- b. **Separación dinámica:** Ciclones de medio denso (fig. 0.4), Separadores Vorsyl, Separador Dyna – Whirlpool.

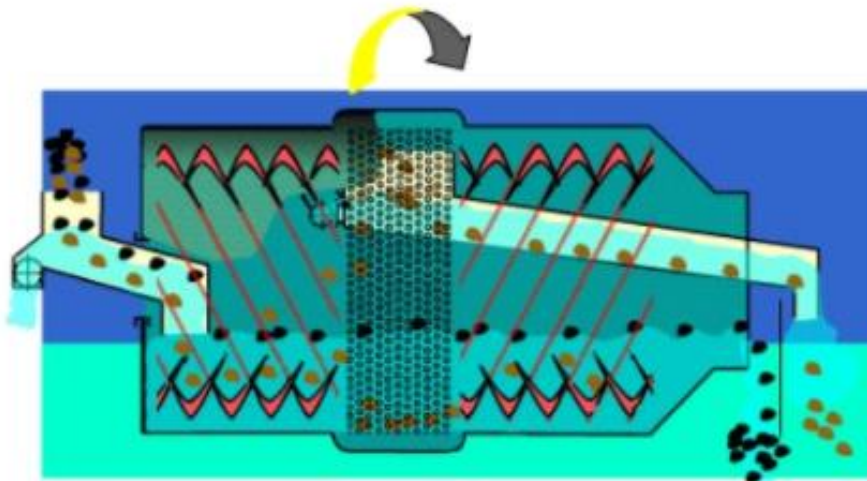


Figura 1.3: Representación sistemática del separador en medio denso del tipo tambor.

Fuente: Concentración gravimétrica. Daniel Álvarez Vega. 2012.

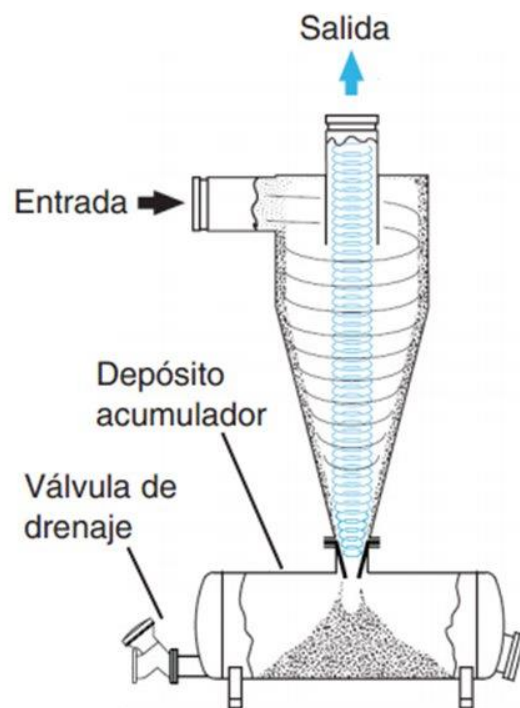


Figura 1.4: Representación sistemática del separador en medio denso del tipo ciclón.

Fuente: (Concentración en Jig. Laboratorio de concentración y flotación de minerales. UNMSM. 2011)

1.3.1.2. En corrientes

- a. Corrientes verticales:** JIGS (fig. 0.5)
- b. Corrientes longitudinales:** Mesas vibratorias (fig. 0.6), espirales (fig. 0.7), vanners, canaletas (fig. 0.8).
- c. Corrientes oscilatorias:** Mesas concentradoras oscilatorias.
- d. Corrientes centrífugas:** Concentradores KNELSON (fig. 0.9).



Figura 1.5: JIG tipo Denver.

Fuente: (Concentración en Jig. Laboratorio de concentración y flotación de minerales. UNMSM. 2011)



Figura 1.6: Mesa vibratoria.

Fuente: (Concentración en Jig. Laboratorio de concentración y flotación de minerales. UNMSM. 2011)



Figura 1.7: Espiral



Figura 1.8: Canaleta.

Fuente: (Concentración en Jig. Laboratorio de concentración y flotación de minerales. UNMSM. 2011)



Figura 1.9: Concentrador KNELSON

Fuente: (Concentración en Jig. Laboratorio de concentración y flotación de minerales. UNMSM. 2011)

1.4. Descripción del experimento

Las pruebas a desarrollar se llevarán a cabo en un JIG simple de diafragma tipo DENVER, el cual fue modificado y arreglado previamente para un funcionamiento eficiente y una correcta evaluación de sus variables operacionales durante el proceso. Cabe recalcar que este equipo se emplea cuando el mineral a recuperar se encuentra grueso, libre y posee una gravedad específica suficientemente alta para permitir su recuperación por este método; es por ello que el material para realizar el experimento lo hemos tomado de arenas aluviales, específicamente de un placer aurífero.

Una vez obtenido el material se realiza una caracterización del mismo así como una evaluación mineralógica, procesos que se detallarán en los próximos capítulos de este trabajo. Posteriormente se selecciona las muestras de material a usar y se lleva a cabo el proceso de concentración en el JIG; obteniéndose de esta prueba un concentrado del mineral de interés conjuntamente con la llamada “ganga”.

Para realizar este procedimiento experimental inferimos en las variables operacionales del equipo modificando cada una de estas y observando los resultados.

1.5. El JIG y su principio de funcionamiento

El JIG es un equipo de concentración gravimétrica muy utilizado en la minería de minerales pesados así como también en la minería aurífera. Esta máquina permite separar los componentes de un mineral de acuerdo a su peso específico, en un fluido que alterna la sedimentación libre y la sedimentación obstaculizada, gracias a la pulsación del líquido producida por diferentes medios. Es decir, es un equipo que utiliza las corrientes verticales para la concentración de minerales.

En los JIGS la separación de minerales de diferentes pesos específicos se logra en una cama, la cual recibe un flujo de agua por pulsación de tal manera que en ella se forman estratos de mineral. El objetivo de la pulsación es aflojar el material de la cama de tal manera que las partículas grandes y de mayor peso específico caigan primero hasta el cedazo y puedan pasar por sus perforaciones los de menor tamaño que ellas y los de mayor tamaño se queden sobre el mismo formando parte de la cama.

Debido al golpe, la cama se levanta normalmente en masa, luego tan pronto comienza la succión, esta tiende a aflojarse, las partículas de la parte inferior caen primero mientras la cama completa este suelta. Al final de la succión del golpe la cama se cierra nuevamente y esto se repite para cada golpe, la frecuencia normalmente varía entre 55 – 330 golpes por minuto. Las partículas finas tienden a pasar por los intersticios de las partículas grandes que se han estabilizado sobre el cedazo. (Edgar B. Alcalá Cruz, Alfredo Flores Corrales, Arturo Beltrán Alfonso. Manual de entrenamiento en concentración de minerales)

Las posibilidades del uso del JIG en la industria minera son muy amplias, especialmente en la minería aurífera, donde puede instalarse después de la molienda primaria para recuperar el oro grueso y laminar. También es muy utilizado como concentrador primario en la minería aluvial.

1.5.1. Tipos de JIG

- JIG manual: Se basa en el principio de cribado hidráulico a mano, en el cual, el aparato necesita un tamiz, un recipiente de agua y una espátula que sirva como espumadera.
- JIG de tamiz movable: Estos equipos constan de un tanque de jigging o cribado, un tamiz, su estructura, un mecanismo para dar al tamiz la oscilación vertical que necesita, un alimentador, mecanismos para suministrar agua y dispositivos para remover las colas y conducir el concentrado. Los JIGS de tamiz movable tienen el mismo principio que los JIGS manuales, sustituyendo el “cribado a mano” por un mecanismo que introduce la alimentación y evacúa los restos.
- JIG de tamiz fijo: Estos equipos están provistos de rejillas estacionarias horizontales que están empotradas en conductos verticales a través de los cuales el agua se impulsa de modo intermitente mediante ciertos mecanismos. Existen 3 tipos de JIGS de tamiz fijo:
 - a. De émbolo: El JIG Harz es el JIG de émbolo más conocido de todos. Está constituido por dos o más compartimientos (una junto a la otra), con sus tamices respectivos. El mecanismo permite que el émbolo se mueva verticalmente hacia arriba y abajo produciendo el jigging.

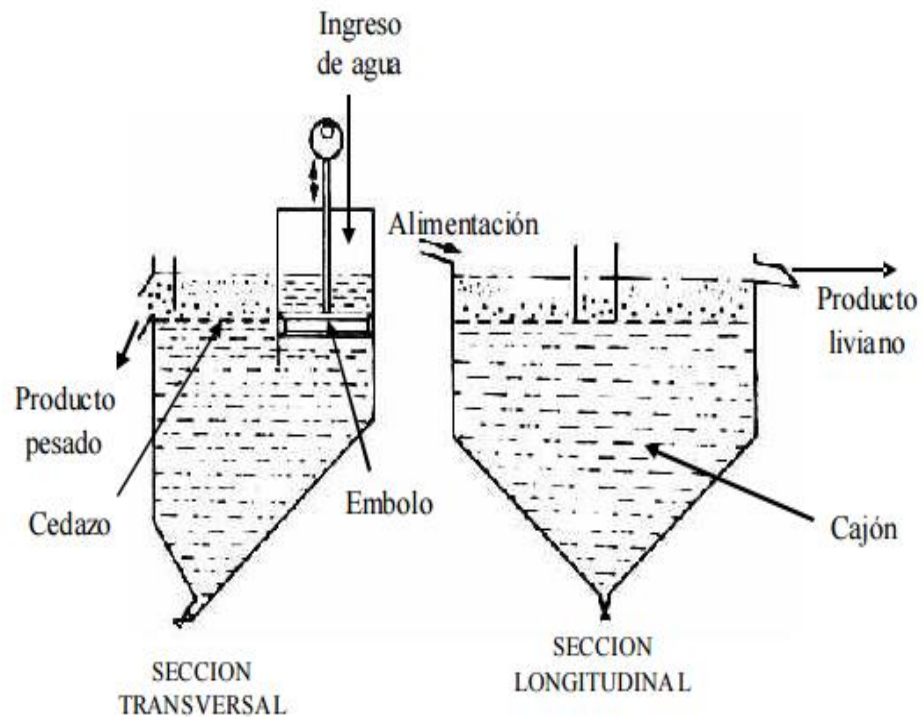


Figura 1.10: JIG Harz

Fuente: Manual de entrenamiento en concentración de minerales. SERGEOTECMIN.

- b. De diafragma: En este equipo las pulsaciones son producidas por movimientos alternados de una pared elástica del propio estanque. El JIG Denver es el equipo de tipo diafragma más conocido y es el cual posee el laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas, por lo que este nos servirá para llevar a cabo el proceso experimental.

El JIG Denver se usa para recuperar minerales pesados como el oro. Es operado a altas velocidades que oscilan entre 300 y 350 pulsaciones por minuto. Las pulsaciones en el compartimiento precipitador se realizan por medio de un diafragma de caucho flexible, movido desde un eje excéntrico. (Solís Carrión & Torres Lupercio, 1994).

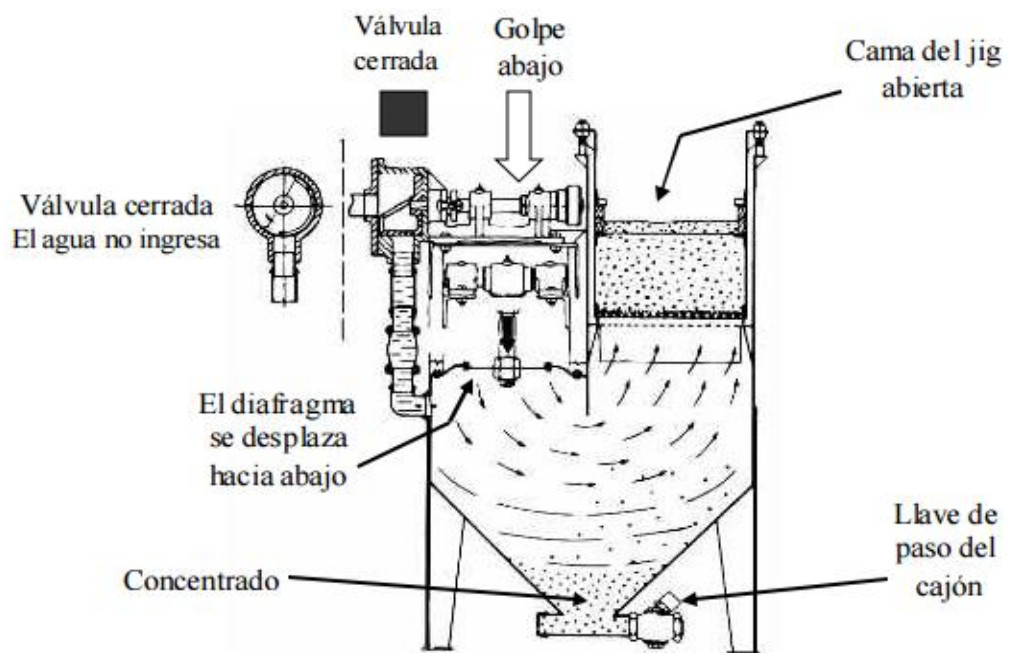


Figura 1.11: Esquema de funcionamiento del JIG Denver con la válvula cerrada.

Fuente: Manual de entrenamiento en concentración de minerales. SERGEOTECMIN.

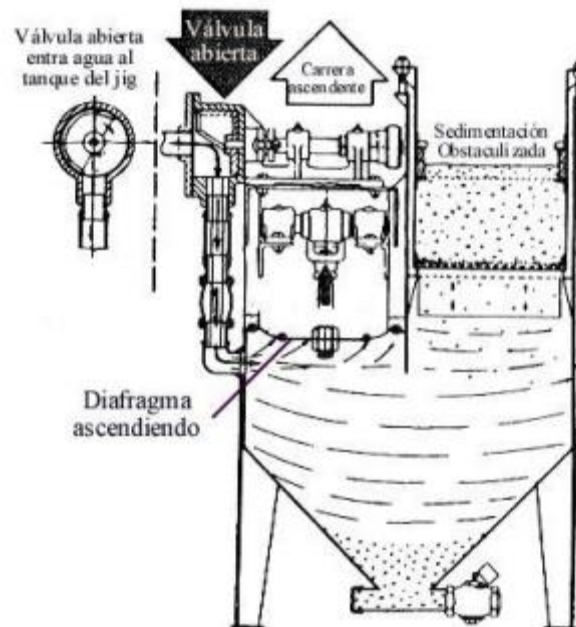


Figura 1.12: Esquema de funcionamiento del JIG Denver con la válvula abierta.

Fuente: Manual de entrenamiento en concentración de minerales. SERGEOTECMIN.

- c. De pulsación: En los cuales las pulsaciones son producidas por chorros discontinuos periódicos del agua y del aire.

1.5.2. Elementos constitutivos de un JIG

Como vimos anteriormente, existen diferentes tipos de JIGS, los cuales difieren por la geometría, accionamiento y otros detalles de construcción. A pesar de la gran variedad de estos equipos se puede decir que ellos se componen de los siguientes elementos:

- Caja con fondo perforado: Esta construida básicamente de hierro con el fin de que no se desgaste muy rápido. La alimentación a la caja se realiza de tal manera que el material sea distribuido sobre todo el ancho del tamiz. La arena de desecho rebosará por el borde recto horizontal del tamiz.
- Depósito o cama hidráulica de agua: Se construye bajo las mismas condiciones que la caja y está provisto de grifos para la descarga continua del concentrado fino.
- Dispositivos mecánicos para producir las pulsaciones: Es el mecanismo de accionamiento y generalmente consta de motor, pistón, diafragma, sistema de lubricación; según sea su accionamiento mecánico, hidráulico – mecánico, hidráulico o neumático.
- Dispositivos de descarga del flotado y del hundido: Puede ser por medio de palas o de forma continua y automática.

1.5.3. Variables que intervienen en el cribado hidráulico (jigging):

- a. Abertura del tamiz: La abertura o los orificios del tamaño del tamiz afectan al cribado hidráulico; orificios grandes hacen que los granos finos lleguen fácilmente a la cámara hidráulica mientras que orificios pequeños respecto a la alimentación pueden provocar una obstrucción del lecho por un tamiz muy fino.

La relación del diámetro del orificio del tamiz respecto al diámetro del grano en la alimentación varía desde 0,09 hasta infinito. JIGS que producen solamente productos de colas y concentrado fino en la cámara hidráulica pueden tener relaciones más grandes que 1. JIGS que no producen concentrado fino tienen relaciones menores que 1. (Solís Carrión & Torres Lupercio, 1994).

- b. Intensidad de pistonada: Determina el grado de dilatación del lecho. No se puede llevar a cabo un análisis de este parámetro por lo que se procede a efectuarlo por tanteo, siempre tratando de reducir a un mínimo la longitud del recorrido, tanto para disminuir la “ebullición” como los esfuerzos mecánicos; sin embargo los granos gruesos necesitan recorridos más largos.
- c. Cantidad de agua: El agua puede ser admitida directamente sobre la cámara hidráulica o sobre el émbolo. La cantidad de agua que se precisa es proporcional al recorrido del émbolo y cabe recalcar que para materiales gruesos se requiere más agua que para materiales finos, ya que los granos más grandes sedimentan más rápido y el agua puede pasar hacia arriba en un pequeño número de grandes intersticios con mucho menos fricción que un gran número de pequeños intersticios. (Solís Carrión & Torres Lupercio, 1994).
- d. Profundidad del lecho: Esta variable es modificable y se logra variando la altura de la compuerta de reboso del vertedero. Hay que enfocarse en evitar la ebullición.
- e. Velocidad o frecuencia del golpe: Esta variable determina prácticamente cuantas rpm debe dar el motor para satisfacer la velocidad necesaria para alcanzar tal grado de depositación de las partículas de interés.
- f. Alimentación: La cantidad de material que entra al proceso en función del tiempo.
- g. Granulometría de la alimentación: Es la variable que controla el tamaño óptimo que debe tener el material que entra al proceso. El tamaño de las partículas no deberá ser tan fino ni tan grueso para satisfacer las demás variables de funcionamiento.

1.5.4. Efectos para la estratificación mineral en el JIG

Según Gaudin, tres son los efectos principales que contribuyen para la estratificación de las especies minerales en el JIG:

- a. Clasificación por caída retardada de las partículas: La fuerza gravitacional ejercida en las partículas será en dirección contraria a la fuerza producida por las corrientes. Así, las partículas se dividen en dos categorías: aquellas en que la fuerza de gravedad es mayor que la impuesta por la corriente ascendente, y que por lo tanto se acumularán en el fondo,

y aquellas partículas que no tienen esta fuerza gravitacional y serán arrastradas por la corriente ascendente.

- b. Aceleración diferencial al inicio de la caída: Cada partícula tendrá al inicio de la caída un determinado valor de aceleración que estará dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{dv}{dt} = \left(1 - \left(\frac{D_f}{D_s} \right) \right) * g$$

Dónde:

- D_f es la densidad del fluido (kg/m³)
- D_s es la densidad del sólido (kg/m³)
- g es la gravedad (m/s²).

Las partículas estarán más afectadas por la aceleración inicial, y por lo tanto, por su densidad, que por su velocidad terminal y por lo tanto por su tamaño.

- c. Consolidación intersticial en el final de la caída: Las partículas pequeñas se depositan en los intersticios entre las partículas gruesas. La consolidación intersticial permite que los granos pequeños, pesados, se muevan a través de los intersticios, inclusive después que el lecho inicie su compactación.

1.5.5. Optimización del equipo

Para el desarrollo de este proyecto se realizarán varios ensayos para de esta forma, determinar bajo qué condiciones se lleva a cabo una mejor concentración. Se irá infiriendo tanto en las variables del equipo como en las variables de operación; para ello, se ha recolectado muestras de un placer aurífero, las cuales serán procesadas en este equipo en suficientes pruebas experimentales.

1.6. Arenas aluviales

Son materiales transportados y depositados por el agua. Su tamaño empieza desde las rocas hasta las gravas gruesas, cantos y bloques y estos tipos de suelos o rocas presentan bordes redondeados y se distribuye en forma de capa mineral sedimentaria y son muy anisótropos.

En la minería aurífera los componentes pesados están constituidos por el oro y diferentes sulfuros (o por arenas negras en la minería aluvial), en tanto que los livianos son cuarzo y diferentes tipos de roca.

1.6.1. Placer aurífero

Los placeres auríferos son quizás los más conocidos entre los placeres aluviales, pero los minerales que cumplen esas propiedades en distintos grados son: casiterita, cromita, columbita, cobre, diamantes, granate, oro, ilmenita, magnetita, monazita, platino, rubí, rutilo, safiro, xenotima y circón.

La mayoría de los depósitos de placeres son de baja ley, pero su explotación es posible debido a que se encuentran en materiales sueltos, no requieren de molienda y pueden explotarse con plantas relativamente baratas.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

2.1. Descripción del material

Se ha podido determinar ciertas propiedades físicas que posee el material a procesar, tales como la densidad, la composición, la textura y el tamaño predominante de sus clastos.

La densidad se determinó mediante una prueba simple de laboratorio, calculando el volumen que ocupa determinada masa del material. Los resultados arrojaron un valor de densidad de 1,7 ton/m³.

Después de un análisis geológico preliminar, se observó que la matriz del material es areno arcillosa de grano medio, con presencia de clastos ígneos y esquistos metamórficos de composición básica e intermedia. Estos clastos tienen tamaños entre 4 y 30 mm; su textura es fanerítica y presentan minerales oscuros. (Figura 2.1.)



Figura 2.1. Material tomado in situ.



Figura 2.3. Perfil estratigráfico para la geología local.

2.3.Recolección de muestras

El material que servirá como muestra para el proceso de experimentación se ha recogido de un placer aurífero ubicado en la margen izquierda del río “Zamora”, Parroquia San Jacinto de Wakambeis, Cantón San Juan Bosco, Provincia de Morona Santiago (Figura 2.4.). La concesión minera “LEON”, con código 9000358 nos ha provisto de las muestras necesarias para el presente proyecto (Figura 2.5).



Figura 2.4. Mapa de ubicación del placer aurífero.

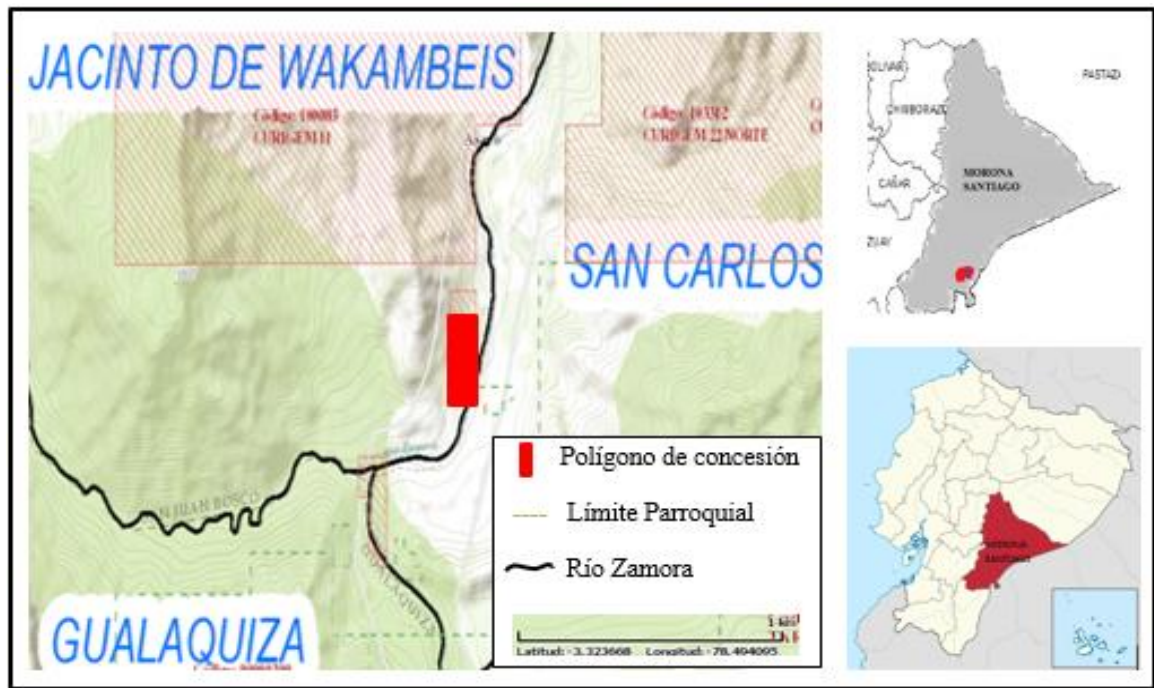


Figura 2.5. Concesión donde se tomaron las muestras.

Fuente: Catastro minero. ARCOM



Figura 2.6. Recolección del material

2.4. Cuarteo de muestras

El cuarteo de muestras es un método para reducir las muestras de material (agregados), obtenidas en el campo, al tamaño requerido para las pruebas y que se conserven representativas. Este procedimiento es aplicable a muestras más o menos homogéneas.

Existen varios métodos para homogenizar y cuartear el material; de entre ellos se destacan el método manual y el mecánico. El primero, solo requiere de la intervención del operador mediante el uso de una pala o espátula, y el segundo se lleva a cabo con equipos de corte automatizado.

Para la caracterización del material, hemos desarrollado un cuarteo manual de la muestra, en el cual hemos tomado una porción representativa de toda la muestra tomada in situ; la apilamos en forma de cono para posteriormente aplastarlo con una pala y segmentarlo en cuatro partes iguales. La teoría nos dice que se deben escoger las dos esquinas opuestas y desechar las otras dos, y así llevar a cabo el proceso hasta que se obtenga la cantidad deseada de muestra.



Figura 2.7. Cuarteo manual de la muestra.

2.5. Granulometría

2.5.1. Clasificación por tamaños

Para llevar a cabo la prueba de clasificación por tamaños, seleccionamos una masa de material aleatoriamente de 1,7 kilogramos, la cual previamente fue secada en horno y cuarteada. Se procedió a realizar una tabla de valores y a construir una gráfica.

Tabla 2.1. Tamaños de los componentes de la muestra obtenidos en el laboratorio de suelos.

TAMAÑO DE LOS COMPONENTES			
Tamiz #	Tamaño (mm)	Peso (gr)	Porcentaje %
3/4	mayor a 19	42	2,47
1/2	entre 12,5 y 19	209	12,29
3/8	entre 9,5 y 12,5	164	9,65
4	entre 4,75 y 9,5	323	19,00
10	entre 2 y 4,75	290	17,06
20	entre 0,85 y 2	239	14,06
30	entre 0,6 y 0,85	87	5,12
40	entre 0,425 y 0,6	123	7,24
50	entre 0,3 y 0,425	84	4,94
100	entre 0,15 y 0,30	75	4,41
200	entre 0,075 y 0,15	32	1,88
PAN	menor a 0,075	32	1,88



Gráfica 2.1. Tamaño de los componentes de la muestra.

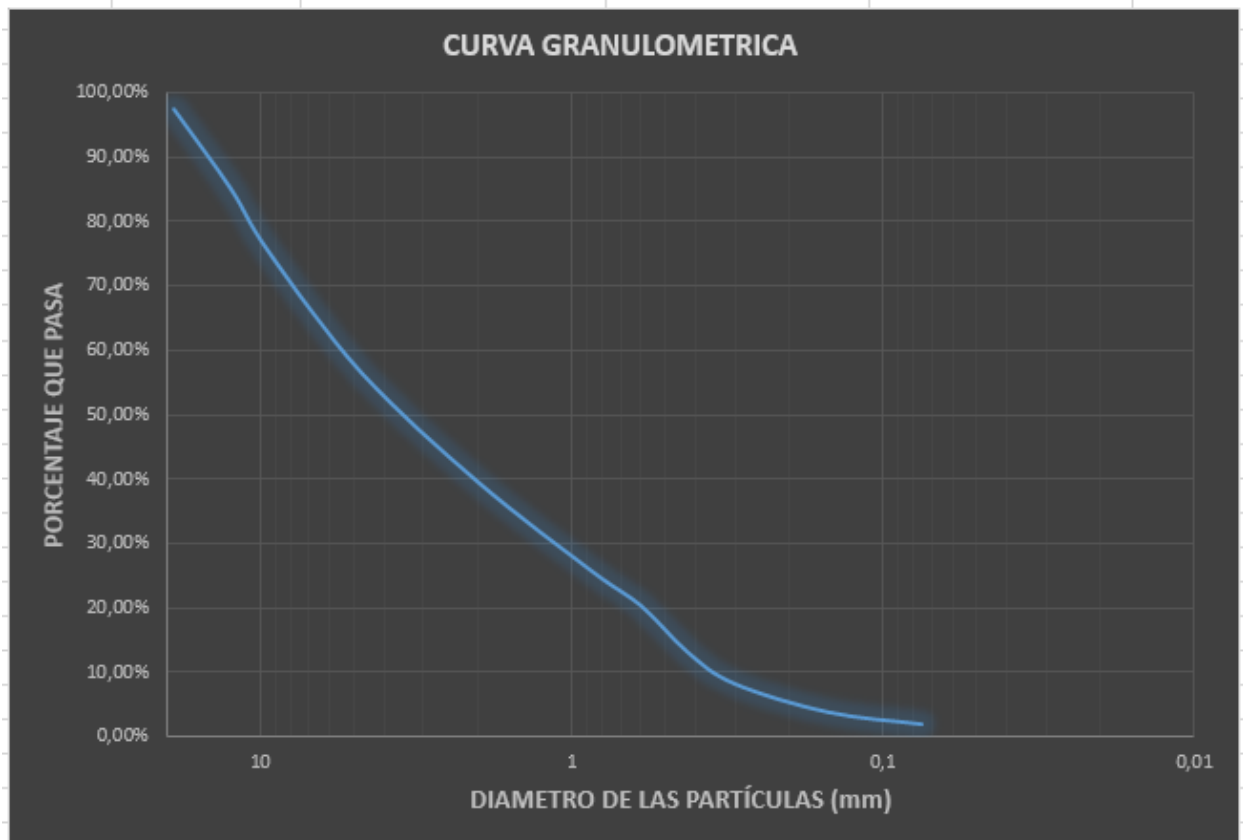
2.5.2. Curva granulométrica

Una curva granulométrica es una representación gráfica que resulta del estudio de un suelo en particular, tomando en cuenta básicamente los tamaños que lo componen. Este proceso de observación o análisis se lo lleva a cabo en un laboratorio de suelos mediante tamices previamente estandarizados. Después de hacer pasar el material por cada tamiz se determina el peso retenido en cada uno de estos y posteriormente se desarrollan cálculos que permiten graficar aquella curva.

Es decir, construir una curva granulométrica es una operación de distribución de las partículas según su tamaño. Construir esta gráfica ayuda a posteriores análisis donde se pueden determinar medias (D80), medianas y varianzas, aunque muchas veces también sirve para analizar tamaños de sedimentación dentro de los procesos de gravimetría.

Tabla 2.2. Valores del diámetro de las partículas y del porcentaje que pasa.

TAMIZ #	DIAMETRO (mm)	MASA SUELO RETENIDO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE QUE PASA
3/4	19	42	2,47%	97,53%
1/2	12,5	209	12,29%	85,24%
3/8	9,5	164	9,65%	75,59%
4	4,75	323	19,00%	56,59%
10	2	290	17,06%	39,53%
20	0,85	239	14,06%	25,47%
30	0,6	87	5,12%	20,35%
40	0,425	123	7,24%	13,12%
50	0,3	84	4,94%	8,18%
100	0,15	75	4,41%	3,76%
200	0,075	32	1,88%	1,88%
FONDO		32	1,88%	
MASA TOTAL		1700		



Gráfica 2.2. Curva granulométrica de la muestra.

2.6.Mineralogía

El análisis mineralógico de las muestras se ha llevado a cabo en el laboratorio de la Universidad del Azuay (Este análisis se puede observar en el Anexo 1). Cabe recalcar que se realizaron pruebas únicamente para determinar la presencia de oro, ya que el presente proyecto busca concentrar dicho metal a través del JIG; por lo que, conociendo la ley de, podremos comprobar la efectividad del proceso de jigging.

Para este análisis utilizamos material previamente cuarteado, secado y tamizado (malla #200). El procedimiento se realizó por duplicación de las muestras, digestión del metal y posteriormente por absorción atómica, arrojando un resultado de 12,5 ppm. Este resultado estará sujeto a transformaciones que la podemos observar en la siguiente tabla:

Tabla 2.3. Cálculo de la Ley del material.

CÁLCULO DE LA LEY DEL MATERIAL								
PPM	Ley (mg/5kg)	Ley (mg/Kg)	Muestra Insitu (kg)	Muestra Lab (Kg)	Ley (gr/20Kg)	Ley (gr/ton)	Densidad (ton/m3)	Ley (gr/m3)
12,5	1,25	125	145	17	14,7	0,10	1,72	0,174

Después de corregir los valores hemos obtenido que la ley de oro que presenta éste material es de 0,174 gramos por cada metro cúbico.

CAPÍTULO 3

PROCESO DE EXPERIMENTACIÓN

3.1. Adecuación del JIG del laboratorio

El concentrador JIG presente en el laboratorio de la escuela de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay no se encontraba en óptimas condiciones para su funcionamiento, por lo que se procedió a repararlo y adecuarlo según las especificaciones técnicas que este equipo las requiere.



Figura 3.1. Estado del JIG antes de su adecuación.

El JIG tipo Denver requiere una velocidad de pulsación de entre 60 y 120 rpm, por lo que se implementó un motor de 3 hp de alta velocidad, calibrado a 120 rpm y que trabaja en una red bifásica. También se construyó un nuevo diafragma con tubo de llanta, el cual resistió a las pruebas sin romperse. Se instaló todo el sistema acoplándolo al excéntrico original, y cambiando totalmente los ejes. Se repararon algunos dispositivos de alimentación y de descarga, y de igual manera algunas fallas presentes en el equipo.



Figura 3.2. Estado actual del JIG del laboratorio de Ingeniería en Minas.

3.2. Análisis de las muestras de entrada

Como observamos al final del capítulo 2, las muestras obtenidas tienen una ley de 0,174 gramos por metro cúbico, es decir 0,10 gramos por tonelada. Según la literatura, el concentrador JIG presenta un 85% de efectividad en la separación de metales pesados por lo que en teoría, deberá recuperar el mineral valioso casi en su totalidad después del jigging o cribado.



Figura 3.3. Verificación de partículas de oro en las muestras a procesar.

3.3.Aspectos generales

En el JIG la separación de minerales de diferentes pesos específicos se logra en un tamiz, el cual recibe un flujo de agua por pulsación de tal manera que en ella se forman estratos de mineral. El objetivo de la pulsación es aflojar el material de la cama de tal manera que las partículas grandes y de mayor peso específico caigan primero hasta el tamiz y puedan pasar por sus perforaciones los de menor tamaño que ellas y los de mayor tamaño se queden sobre el mismo, formando parte de la cama. Debido a las pulsaciones, la cama se levanta normalmente en masa, luego tan pronto comienza la succión ésta tiende a aflojarse, las partículas de la parte inferior caen primero mientras la cama completa este suelta. Al final de la succión, la cama se cierra nuevamente y esto se repite para cada golpe. Las partículas finas tienden a pasar por los intersticios de las partículas grandes que se han estabilizado sobre el cedazo. (Edgar B. Alcalá Cruz, Alfredo Flores Corrales, Arturo Beltrán Alfonso. Manual de entrenamiento en concentración de minerales. Proyecto Nacional de Geología y Técnico de Minas – SERGEOTECMIN).

3.4.Determinación del tamaño máximo del alimento

Debido a que el tamaño de la alimentación en el jigging o cribado hidráulico es muy importante, la estudiaremos por separado de las demás variables que intervienen en el proceso.

Según Solís Carrión y Torres Lupercio, para todas las formas de concentración usando la gravedad, es necesario triturar el material a un tamaño lo suficientemente fino para que las partículas sean en su mayor parte, una sola especie mineral y dependan únicamente de su peso específico al momento de la concentración.

Otros autores afirman que si el material de alimentación es relativamente uniforme, entre 3 y 10 mm, se puede lograr una óptima concentración; esto, basándose en que el JIG es normalmente utilizado para materiales relativamente gruesos.

Por otra parte otros artículos explican según la figura 3.3, el tamaño que debe tener la alimentación para cada equipo de concentración gravimétrica.

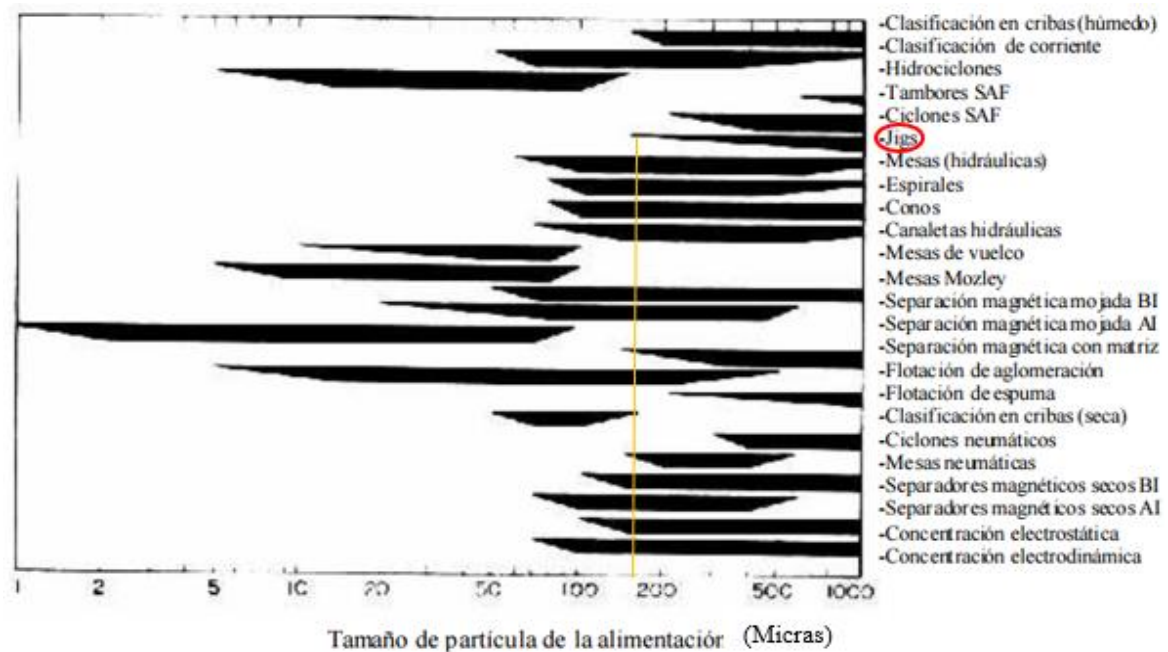


Figura 3.4. Rango efectivo de aplicación de técnicas convencionales para el procesamiento de minerales.
Fuente: Manual de entrenamiento en concentración de minerales. SERGEOTECMIN.

Como podemos observar, la literatura sugiere que el tamaño de la partícula en la alimentación de un JIG, debe oscilar entre 170 y 1000 micras (0,17 mm – 1 mm).

Es conocido que la eficiencia de los procesos gravimétricos aumenta con el tamaño de las partículas; las partículas demasiado pequeñas responden relativamente mal a estos procesos de concentración, por lo que hemos decidido llevar a cabo el proceso experimental realizando una prueba en el concentrador JIG, utilizando tamaños de alimentación ni tan finos ni tan gruesos: La prueba tendrá un tamaño de partículas en la alimentación entre 0,5 y 1 mm.



Figura 3.5. Muestras listas para el procesamiento en el JIG.

3.5. Determinación de los factores y variables operacionales

3.5.1. Abertura del tamiz

La abertura del tamiz afecta al cribado hidráulico ya que si tenemos una abertura grande, los granos finos llegarán con facilidad a la cámara donde se almacena el concentrado; una abertura pequeña por su parte, puede obstruir el lecho del JIG.

Según Solís Carrión y Torres Lupercio, la relación del diámetro del orificio del tamiz respecto al diámetro del grano en la alimentación varía desde 0,09 hasta infinito. Otros autores sugieren que la abertura del tamiz sea igual a 3 veces el tamaño de la partícula mayor de la mena alimentada. Es por ello que hemos elegido un tamiz con abertura de 2 mm ya que así se cumplen las dos condiciones que recomienda la literatura; si usamos dicha abertura, la relación del orificio del tamiz respecto al diámetro del grano está entre 2 y 4, por lo que cumple la condición, ya que está entre 0,09 e infinito y por ende cumple la otra condición que sugiere que la abertura sea 3 veces el tamaño de la partícula, que será de 0,5 y 1 mm como lo acotamos en el numeral 3.4.

Debido que los orificios del tamiz serán más grandes que el grano de la alimentación, el JIG producirá solamente concentrados finos tanto en la cámara de concentración como en su producto de colas. Por esta razón también habrá que adicionar un fondo de lecho para limitar el pasaje de granos de concentrado en la cámara hidráulica.



Figura 3.6. Tamiz del JIG

3.5.2. Lecho del JIG

En los JIGS la separación de minerales de diferentes pesos específicos se logra en un lecho, el cual recibe un flujo de agua por pulsación de tal manera que en él se forman los estratos de mineral.

El lecho del JIG puede ser de varios tipos de formas y de materiales como acero, fierro o incluso de mena mineral, aunque en la actualidad se utiliza material artificial llamado granalla.

La literatura sugiere que el tamaño de las partículas del lecho deberá ser mínimo 2 veces la abertura de la criba, es por ello que el lecho utilizado para el experimento será una gravilla de entre 2,36 y 4,75 mm de diámetro aproximadamente.

En cuanto a la densidad del lecho, se dice que cuanto más fina es la alimentación, más densa deberá ser la capa de éste, y por otro lado la teoría sugiere que el lecho deberá ser de una densidad media por lo que el material escogido (gravilla) cumple con las condiciones.

La altura del lecho por su parte, no debe ser muy pequeña ya que podría producir un efecto de turbulencia que perturba el movimiento alternado de pulsión y succión. No existe ecuación alguna que determine la altura de la cama, por lo que el proceso se vuelve muy empírico en esta variable, llevándose a cabo por tanteo hasta obtener mejores resultados; sin embargo se sugiere que para menas menores a los 2 mm la altura del lecho deberá ser 30 o 40 veces el diámetro de dicha alimentación. Es decir, la altura inicial de la gravilla (cama) con la que desarrollaremos el ensayo puede oscilar entre 15 y 40 mm.



Figura 3.7. Lecho del JIG.

3.5.3. Cantidad de agua

El agua es el fluido que usa para mantener el lecho dilatado por un tiempo más largo y evitar una obstaculización muy alta a partículas gruesas de mineral denso. (Harold Iván Concha Rodríguez. Estudio de la concentración gravimétrica de minerales Auríferos en un JIG de laboratorio).

La variación en la cantidad de agua que entra al proceso afecta directamente al jigging y no existe ninguna fórmula para calcular su volumen. Es decir, se maneja de forma empírica y se calibra de acuerdo a las demás variables del equipo, por lo que el operador juega un papel muy importante en este factor. La cantidad de agua va de la mano con la longitud del golpe o intensidad de pistonada, y se dice que el agua estará en condiciones favorables cuando la mano del operador sobre el lecho pueda hundirse y detectar un jalón suave durante la succión.

3.5.4. Intensidad de pistonada

Como se señaló en la parte 3.1, el JIG tipo Denver requiere entre 60 y 120 pulsaciones por minuto. Sin embargo, otra parte de la literatura sugiere que este equipo trabaje con ciclos relativamente cortos, entre 100 y 400 revoluciones por minuto, teoría que también la respalda Solís Carrión y Torres Lupercio, sosteniendo que rara vez la frecuencia sobrepasa las 300 revoluciones por minuto. Es por ello, que ajustamos el motor de alta velocidad, para que trabaje con 125 pulsaciones por minuto y con una amplitud del diafragma de aproximadamente 7 milímetros. Esta última variable es sugerida en varios experimentos de laboratorio en un JIG, los cuales sustentan que para alimentaciones finas (500 micras aproximadamente), dicha amplitud requerida oscila entre 3 y 20 mm.

3.6. Procesamiento de las muestras en el equipo

El proceso en sí es sencillo, pero el operador debe tener la destreza para ir modificando las variables con el objetivo de llegar a una buena separación de los minerales. De todo el material tomado del placer aurífero, solo se procesó 14 kilogramos. Dicha muestra representativa fue seleccionada después de una clasificación y tamizado del material, ya que cumplía con el tamaño de alimentación ya establecido previamente.

Posteriormente, el material fue llevado al JIG para su separación gravimétrica.



Figura 3.8. Proceso de concentración en el JIG.

Después del procesamiento se obtuvo un pre concentrado con partículas finas de oro presentes en una matriz de minerales pesados tales como la magnetita.



Figura 3.9. Presencia de partículas de oro en el material pre concentrado.

3.7.Observación de posibles problemas

Se puede observar que el rebalse del JIG está caracterizado por estar enriquecido de partículas finas y livianas, mientras que la descarga del mismo se favorece por estar enriquecido de partículas gruesas y densas. Sin embargo existe un intervalo de difícil separación, esto es, las partículas finas densas poseen la tendencia de salir del JIG por la misma corriente donde salen las gruesas pesadas y por lo tanto no ocurre una separación clara entre grupo de partículas. (Notas de Concentración de Minerales, I M CIMEX, 2008)

Es decir, se produce una separación confusa que se puede notar claramente en cuanto se abre la válvula de concentración; si bien las partículas son separadas por su peso específico, no se separan por su granulometría, lo que dificulta observar un concentrado como tal y por ende, tampoco se observa el mineral de interés. Esta es una propiedad típica del JIG.

3.8.Ajustes

Debido a los problemas típicos que posee el JIG durante su funcionamiento, hemos debido realizar ajustes en dos variables de operación:

- La primera corrección se la hizo directamente en la alimentación, homogenizando los tamaños del material de entrada, debido a que las partículas grandes estaban confundiendo la separación con las partículas pequeñas pero con mayor peso específico. Se notó una gran diferencia con este ajuste, pero debido a que es una propiedad característica del equipo, los resultados mejoraron parcialmente.
- Otro ajuste que notamos que era necesario, fue aumentar el lecho sobre el tamiz con el objetivo de llevar a cabo una sedimentación más obstaculizada donde los minerales livianos no se percolen hacia el fondo de la caja y por ende caigan hacia la válvula de concentrados.
- También se infirió en el tiempo de procesamiento, llevando a cabo pruebas más largas, de aproximadamente 12 minutos.

CAPÍTULO 4

CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Cálculos y resultados

Después de haber llevado a cabo el proceso de experimentación, se realizan los cálculos para comprobar lo que se planteó en la teoría y sobre todo para saber si el equipo trabaja con efectividad, y los criterios analizados fueron los correctos. Dichos cálculos se plantean en base a ciertos índices metalúrgicos que nos permiten conocer la efectividad del equipo frente a este material a procesar.

4.1.1. Criterio de concentración

Como ya lo acotamos en el primer capítulo, el criterio de concentración es un coeficiente que determina si la separación es posible para cualquier proceso gravimétrico. Para ello debemos calcular primeramente la densidad de los minerales pesados y de los livianos:

- Densidad de los minerales pesados (D_h): Para determinar la densidad de los minerales pesados se tomó una muestra aleatoriamente del pre concentrado obtenido en el JIG, la pesamos y determinamos su volumen mediante una prueba sencilla de laboratorio. La masa usada fue de 37,55 gramos y su volumen correspondiente fue de 8 cm³. Por ende, la densidad es igual a 4,69 g/cm³.



Figura 4.1. Minerales pesados obtenidos del proceso de jigging.

- Densidad de los minerales livianos (Dl): De igual forma, para determinar la densidad de los minerales livianos se realizó el mismo procedimiento con una masa de 90 gramos y su volumen correspondiente de 41cm³. Como resultado la densidad fue de 2,19 g/cm³.



Figura 4.2. Cálculo de la densidad de los minerales livianos.

- Densidad del líquido o fluido (Df): Para el procesamiento del material en el JIG no se utilizaron medios densos por lo que el fluido usado fue agua, líquido que en condiciones normales tiene una densidad de 1 g/cm³.

Con estos datos ya podemos calcular el Criterio de Concentración (CC). Como lo habíamos citado en el capítulo 1, su fórmula es:

$$C.C = \frac{Dh - Df}{Dl - Df} = \frac{4,69 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}}{2,19 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}} = 3,09$$

Debido a que nuestro criterio de concentración supera los 2,5 establecidos en la teoría de Taggart, será relativamente fácil aplicar un proceso gravimétrico para este tipo de material siempre y cuando tenga tamaños por debajo de los 75 μm (tamaños hasta 200 mallas).

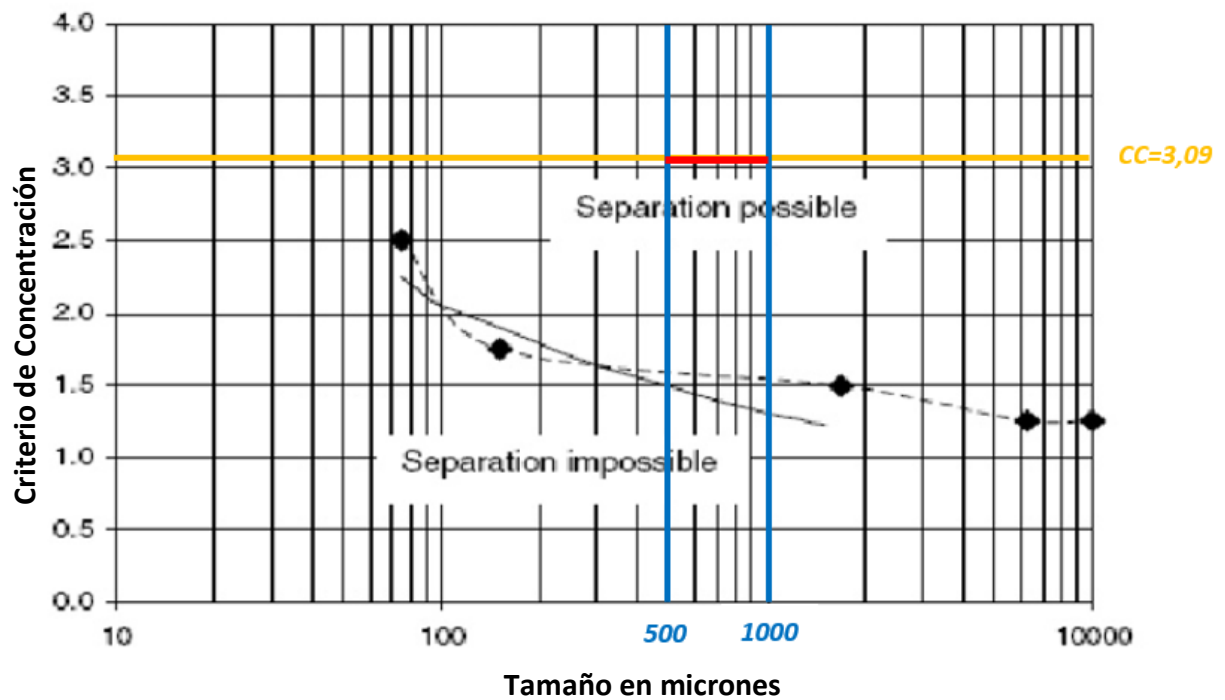


Figura 4.3. Abaco de Criterio de Concentración según el material de estudio.

Fuente: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2012.

En la figura 4.3. se puede observar que la separación gravimétrica es posible para este tipo de material, por lo que solamente queda comprobar si el JIG resulta efectivo para su concentración.

4.1.2. Efectividad del JIG (Índices metalúrgicos)

Según el artículo “Mineral Processing Design and Operation”, las variables que más influyen en el cribado hidráulico son el tamaño de alimentación y el porcentaje de sólidos en la pulpa. La separación de metales pesados en el JIG se desarrolla bajo condiciones normales siempre y cuando el tamaño de los granos oscile entre 50 μ m y 20 mm, lo que significa que nuestro proceso experimental está dentro del rango. En cuanto al porcentaje de sólidos, el proceso se llevó a cabo con un 50 % de sólidos en la pulpa, lo que también hace que se desarrolle una operación normal. Estos factores están resaltados en la siguiente tabla; los demás valores y variables de esta tabla no se han tomado en cuenta ya que son para procesos donde el mineral de interés es el carbón (coal) y el estaño (tin).

Es decir, tomando en cuenta estos dos factores el proceso debe llevarse a cabo con total normalidad y el equipo debe llevar a cabo su operación con alto grado de efectividad.

Tabla 4.1. Efectos operacionales según algunas variables que intervienen en el jigging.

Variable	Value	Effect on Jig operation
Ragging density	increasing	decreases heavy fraction flow
Ragging size	increasing	increases heavy fraction flow
Ragging depth	increasing	decreases heavy fraction flow
Ragging contamination	increasing	decreases heavy fraction flow
Feed size	50 μm – 20 mm	normal range for heavy mineral separation
Feed size	0.5 – 200 mm	normal operation for coal
Capacity	17 – 25 t/h/m ²	normal for tin
Capacity	30 – 60 t/h/m ²	normal for coal
% solids	30 – 50%	normal operation
Hutch water	increasing	increases recovery to a maximum
Hutch water	increasing	increases enrichment ratio

Fuente: Gravity Separation. 2006. Mineral Processing Design and Operation.

Por otra parte, existen índices metalúrgicos que precisan la calidad de la separación efectuada en los procesos gravimétricos y nos proporcionan información acerca del trabajo que realiza el equipo con el que estamos trabajando. Los índices que tomaremos en cuenta son los siguientes:

- Recuperación R (eficiencia del JIG): 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. Para calcular la Recuperación nos basamos en la siguiente fórmula: $R = \frac{C \cdot t_c}{A \cdot t_a}$

Donde:

C es el peso del concentrado en kg

t_c es el tenor del concentrado en ppm

A es el peso del mineral útil en el alimento en kg

t_a es el tenor del mineral útil en el alimento en ppm

(Notas de Concentración de Minerales. M. O Bustamante, A. C. Gaviria y O. J. Restrepo. I M CIMEX, 2008).

Como señalamos en el numeral 3.6, únicamente tomaremos 14 kilogramos de muestra para el alimento; dicho alimento tiene un tenor de 12,5 ppm (Anexo 1), que fue analizado en el laboratorio de la Universidad del Azuay. Después de realizar el proceso en el JIG, recuperamos un pre concentrado de 2 kilogramos, el cual tiene un tenor de 69,5 ppm (Anexo 2), que también fue analizado en el laboratorio de la Universidad del Azuay.

Con estos datos procedemos a calcular la recuperación R:

$$R = \frac{2 \text{ kg} * 69,5 \text{ ppm}}{14 \text{ kg} * 12,5 \text{ ppm}} = 0,79 = 79 \%$$

Con este resultado, podemos observar que el 79% del mineral de interés se recupera en la corriente de concentrado, y el 21% restante va hacia las colas.

- Razón de enriquecimiento Re: 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, entonces: $Re = \frac{tc}{ta}$

Donde:

tc sigue siendo el tenor del concentrado en ppm

ta es el tenor de la alimentación en ppm

(Notas de Concentración de Minerales. M. O Bustamante, A. C. Gaviria y O. J. Restrepo. I M CIMEX, 2008).

Debido a que tc y ta son los mismos valores de la ecuación anterior, la razón de enriquecimiento es:

$$Re = \frac{69,5 \text{ ppm}}{12,5 \text{ ppm}} = 5,56$$

El valor de Re en un proceso de concentración debe ser siempre mayor a 1; si es menor que 1 no se produce concentración, y conforme se aleje de 1 (y que sea mayor), mejor será la concentración.

4.1.3. Tenor en Colas

En un proceso de concentración siempre existirá un material de salida aparte del concentrado, el cual es denominado “colas” y se caracteriza porque su tenor del mineral de interés es muy bajo (tendiendo a cero) o nulo.

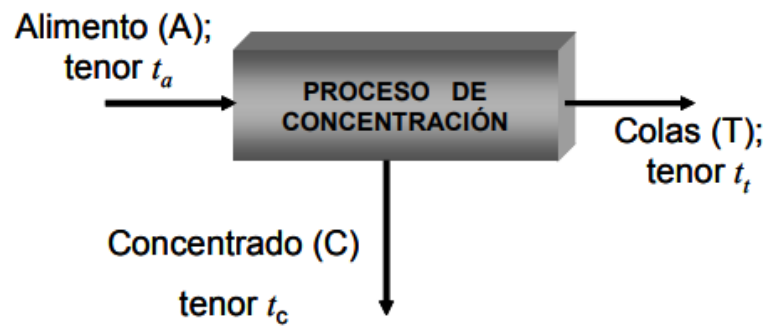


Figura 4.4. Esquema general de separación en un concentrador detallando la corriente de entrada (Alimento), y las corrientes de salidas (Concentrado y Colas).

Fuente: Notas de Concentración de Minerales. I M CIMEX, 2008.

La ley o tenor en el material proveniente de colas siempre deberá tender a cero para acercarse a un proceso de recuperación ideal; Mientras más cerca esté a cero, se puede decir que el concentrado realmente ha sido eficaz.

Para calcular el tenor t_t de las colas obtenidas en nuestro procedimiento, nos apoyamos en una ecuación de balance de masas donde sus variables serán la masa que interactúa en el proceso conjunto con las leyes o tenores en sus entradas y salidas:

$$m_a * t_a = m_c * t_c + m_t * t_t$$

Donde:

- m_a es la masa en la alimentación en kg
- t_a es el tenor del mineral de la alimentación en ppm
- m_c es la masa del concentrado en kg
- t_c es el tenor del concentrado en ppm
- m_t es la masa de las colas en kg
- t_t es el tenor de las colas en ppm

Entonces, con los datos del inciso 3.9.2. Calculamos el tenor t_t :

$$14 \text{ kg} * 12,5 \text{ ppm} = 2 \text{ kg} * 69,5 \text{ ppm} + 12 \text{ kg} * t_t$$

$$t_t = 3 \text{ ppm}$$

Con este resultado, podemos observar que la ley o tenor del mineral de interés en las colas es de 3 ppm (partes por millón), lo cual, relacionado con el tenor de entrada, se acerca mucho a 0 y nos muestra que el proceso de separación se ha llevado de buena forma.

4.2.Determinar los tiempos de procesamiento

Después de realizar varias pruebas en el equipo y manteniendo constantes las demás variables, hemos determinado que el tiempo óptimo de cribado hidráulico para este tipo de material, oscila entre los 8 y 10 minutos. Este tiempo es estimado y recomendable para procesar aproximadamente 0,2 toneladas por hora. Es decir, las pruebas nos demuestran que el JIG necesita entre 8 a 10 minutos para procesar aproximadamente 30 kg de material.

4.3.Cálculo de energía y costos

Sabemos que el motor instalado en el JIG consume un total de 0,045 kwatts por minuto de trabajo, por lo que en sus 10 minutos (tiempo estimado para procesar 30 kg), consumiría 0,45 kwatts. Se sabe también que el precio del Kwatt en Ecuador para la industria es de 0,091 dólares; con estos datos podemos calcular el costo de procesamiento por tonelada de material, realizando los siguientes cálculos:

$$(0,45 \text{ kwatts}/10 \text{ min}) * (0,091 \text{ \$/kwatt}) = 0,041 \text{ \$} / 10 \text{ min}$$

El resultado anterior también podemos expresarlo en función del peso de material procesado: 0,041 \$ / 30 kg

Cambiando la unidad de medida del peso, tendríamos lo siguiente:

$$\frac{0,041\$}{30 \text{ kg}} \cdot \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 1,36 \text{ \$/ton}$$

Es decir, para procesar 1 tonelada de material en el JIG del laboratorio de Ingeniería en Minas, se gasta aproximadamente \$ 1,36 dólares en consumo de energía.

4.4. Analizar si el equipo puede ajustar sus variables para procesar muestras futuras

El objetivo principal de este proyecto es determinar las propiedades operativas del JIG para procesar material tomado de un placer aurífero, pero al estar óptimamente diseñado y equipado, permite operar con otro tipo de muestras ya sea proveniente de vetas, terrazas aluviales, etc.

Una de las ventajas de utilizar este equipo para procesos de concentración gravimétrica, es que nos permite inferir en sus variables operativas para modificarlas y lograr óptimos resultados. Aunque en estos procedimientos juega mucho la destreza y la técnica del operador para manejar el JIG, también podemos establecer medidas fijas para muestras futuras, como lo dijimos anteriormente. Debido a que no existe información técnica sobre cómo manejar las variables con los distintos tipos de material a procesar, hemos llevado a cabo varias pruebas que pueden corroborar lo siguiente:

- En cuanto a la alimentación, se podrá proveer al JIG con material de hasta 3 milímetros de diámetro, siempre y cuando este sea homogenizado previamente. Es decir, toda la muestra que entre al proceso deberá tener igual tamaño de partícula.
- El tamiz del equipo deberá ser modificado si se trabaja con muestras de diferente tamaño a las que se trabajó en este proyecto (0,5 – 1 mm). Para ello, se deberá tomar en cuenta que la relación del diámetro del orificio del nuevo tamiz respecto al diámetro del grano en la alimentación podrá variar desde 0,09 hasta infinito y la abertura de dicho tamiz sea igual a 3 veces el tamaño de la partícula mayor de la mena alimentada.
- Por su parte, el lecho del JIG deberá tener granos mínimo 2 veces la abertura de la criba.
- El líquido a usarse para este proceso es agua y el volumen o caudal dependerá de la destreza del operador y deberá mermarse o incrementarse según las demás variables; se dice que se puede notar si el agua está en buena medida cuando el

operador sumerge la mano y siente una succión y una pulsión fruto del movimiento pulsatorio que ejerce el JIG.

- La intensidad de la pistonada del JIG se mantiene constante en todo el proceso.

Después de analizar estos factores teórica y experimentalmente, sabemos que este equipo es capaz de procesar otro tipo de muestras modificando ciertas variables y con la ayuda de un buen manejo por parte del operador.

4.5. Análisis de resultados

- La densidad de los minerales pesados (pre concentrado y concentrado) es mucho mayor (relación de 2 a 1) que la densidad de los minerales livianos (colas) y por tal razón el coeficiente resultante supera los 2,5 que establece la teoría como coeficiente mínimo de criterio de concentración. Por tanto, para este material de placer, la concentración se llevará de buena manera.
- La recuperación tiene una efectividad del 79%. Este porcentaje es respaldado por la literatura, la cual dice que un proceso gravimétrico en un equipo concentrador JIG deberá tener una eficiencia de entre 80 y 85 %. El valor de efectividad obtenido en nuestro equipo está muy cerca y prácticamente cumple con los parámetros óptimos; aunque se podría mejorar con mayor práctica y destreza del operador.
- La razón de enriquecimiento, al ser mayor que 1 en nuestro experimento, corrobora con el resultado obtenido en el criterio de concentración y asegura un buen proceso de cribado hidráulico en el JIG.
- El tenor en las colas es bajo y se acerca a 0 en relación con el tenor de alimentación, lo que nos indica también un buen proceso de separación aunque se puede optimizarlo homogenizando perfectamente el material y modificando variables como el agua que entra al proceso.
- El tiempo de procesamiento necesario para concentrar muestras provenientes de este placer aurífero es de aproximadamente 8 a 10 minutos.

CONCLUSIONES:

Después de haber adecuado el JIG, construido algunas de sus partes fundamentales a partir de cero y llevado a cabo el proceso experimental, podemos concluir que:

- Este equipo, al poseer un funcionamiento mecánico y teniendo en cuenta las variables que intervienen, nos permite concentrar material de un placer aurífero en menor tiempo respecto a los métodos tradicionalmente utilizados.
- Las variables que infieren directamente en el proceso de cribado hidráulico o jigging son: tamaño de alimentación, abertura del tamiz, material de lecho, intensidad de pistoneada y la cantidad de agua.
- El JIG tiene una propiedad típica que puede resultar un problema al momento de llevar a cabo procesos de concentración: se produce una separación confusa ya que las partículas son separadas por su peso específico y no por su granulometría, lo que dificulta observar un concentrado como tal cuando el material no está previamente homogenizado.
- El operador deberá tener una alta destreza y conocimiento de los conceptos gravimétricos para que a la hora de desarrollar este proceso sepa inferir en ciertas variables que permitan una alta recuperación de mineral.
- Después de haber realizado una caracterización física y química del material obtenido del placer aurífero, se sabe que este tiene una ley de oro de 0,174 gr/m³.
- Si bien es cierto que para este proyecto se usó únicamente material de río, se puede procesar otro tipo de muestras modificando ciertas variables de operación.
- Mientras más constante sea la alimentación del material, más rápidamente se procesará dicho material.
- Los índices metalúrgicos indican que el proceso de concentración se desarrolla de buena manera alcanzando un 79% de efectividad al momento de recuperar el mineral de interés.

- El costo energético para procesar 1 tonelada de material bordea los \$1,36 dólares, su mantenimiento es barato y su fabricación y adecuación son relativamente económicas comparadas con otros equipos gravimétricos que cumplen el mismo proceso. Es decir, trabajar con un JIG reduce notablemente los gastos y trabaja de buena manera.

RECOMENDACIONES:

- Se recomienda cambiar el lecho del JIG de grava o gravilla a granallas, que son básicamente bolas de metal cuya densidad sea una media entre los minerales livianos y los minerales pesados del material; esto debido a que las granallas son de forma esférica y al estar unidas en el lecho ayudan a una buena sedimentación obstaculizada en el proceso de cribado y las partículas pesadas se separan de mejor forma de las livianas a través de los intersticios que forman dichas esferas.
- Homogenizar perfectamente todo el material de alimentación, ya que fácilmente el cribado se puede ver afectado cuando las partículas gruesas se confunden con las finas al tener semejante peso, interfiriendo directamente con la densidad.
- Se recomienda al operador tener una buena destreza, manejando muy bien los tiempos de procesamiento y añadiendo o quitando agua al equipo si es necesario. El éxito también depende de este factor.
- Implementar un sistema de drenaje en el laboratorio de ingeniería en minas, ya que el agua no recircula al equipo, produciendo inundaciones y estanques en el suelo. Lo ideal sería tener un cuarto húmedo para estos equipos de concentración gravimétrica.
- Se recomienda la utilización de una tolva que alimente el material uniforme y constantemente.
- Realizar mantenimientos periódicos al equipo, así como una correcta limpieza debido al polvo y partículas que se generan.
- Usar el manual para el uso del equipo que se encuentra en el anexo 3 de este trabajo.
- Usar los equipos de protección personal adecuados al momento de llevar a cabo los procesos en el JIG, estos son: guantes, auriculares, mandil.

BIBLIOGRAFÍA

Alcalá, E., Flores, A. & Beltrán, A. (2009). SERGEOTECMIN. Manual de entrenamiento en concentración de minerales. Bolivia.

Alvarez, A. (2006). Tecnología de la concentración centrífuga. La Paz, Bolivia.

Bustamante, M. O., Gaviria A.C. & Restrepo, O. J. I M CIMEX (2008). Notas de concentración de minerales. Medellín, Colombia.

Bustamante, M. O. (2006). Mineralurgia – Instituto de minerales, CIMEX. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Cierpisz, S. (2016). A dynamic model of coal products discharge in a jig. Polonia.

Concha, H. INGEOMINAS. Estudio de la concentración gravimétrica de minerales auríferos en un jig de laboratorio. Cali, Colombia.

Ingeniería metalúrgica - Universidad Nacional del centro del Perú Huancayo. Microscopía óptica y sus aplicaciones en metalurgia: La determinación del grado de liberación-mineralógica.

<http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/determinacion-grado-liberacion-mineralogica/determinacion-grado-liberacion-mineralogica.pdf>

López, C. & Knelson Gravity Solutions. (2003). Universidad Nacional de Colombia, CIMEX. Concentración gravimétrica: fundamentos y avances. <https://es.scribd.com/document/207337031/Concentracion-Gravimetrica>

Ospina, M. A. (2014). Modelamiento de la hidrodinámica de la separación gravimétrica de minerales en jigs. Medellín, Colombia.

Pita, F. & Castilho, A. (2015). Influence of shape and size of the particles on jigging separation of plastics mixture. Coimbra, Portugal.

Solís, C. & Torres, L. (1994). Diseño, construcción y optimización de un JIG. Cuenca, Ecuador.

Woollacott, L. C. & Silwamba, M. (2016). An experimental study of size segregation in a batch jig. Johannesburgo, Sudáfrica.

ANEXOS

Anexo 1: Análisis químico del alimento


**REPORTE DE RESULTADOS
QUÍMICOS**

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

ORDEN No.: N/A	FECHA RECEPCIÓN: 31/05/2017	FECHA DE ENTREGA: 02/06/2017
CODIGO LAB: Q	CLIENTE: Juan Diego Ávila	DIRECCIÓN: Calle Cajas y colorados
RUC/CEDULA: 1400631378	MUESTRA: Arena	CANTIDAD: 10 gramos
CONDICION DE LA MUESTRA: Ambiente	MUESTREADO POR: Cliente	ANALISIS SOLICITADO: oro

IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):

Q-01	# 1
------	-----

RESULTADOS

Muestra: Q-01

Análisis	Unidades	Método	Resultado	Límites de Detección	Requisito
oro	ppm	Absorción Atómica	12.5	0.2 mg/Kg	N/A

OBSERVACIONES:

Abreviaturas:

N/A: No Aplica



Técnico Responsable

Directora de Calidad

Director Técnico

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.



Anexo 2: Análisis químico del concentrado


**REPORTE DE RESULTADOS
QUÍMICOS**

Código: SGCUDAL-F-004
Versión: 3
Fecha: 2014/06/10

ORDEN No.: N/A	FECHA RECEPCIÓN: 07/09/2017	FECHA DE ENTREGA: 08/09/2017
CODIGO LAB: Q	CLIENTE: Juan Diego Ávila	DIRECCIÓN: Calle Cajas y colorados
RUC/CEDULA: 1400631378	MUESTRA: Arena	CANTIDAD: 10 gramos
CONDICION DE LA MUESTRA: Ambiente	MUESTREADO POR: Cliente	ANALISIS SOLICITADO: oro

IDENTIFICACION DE LA (S) MUESTRA(S):

Q-01	# 1
------	-----

RESULTADOS

Muestra: Q-01

Análisis	Unidades	Método	Resultado	Límites de Detección	Requisito
oro	ppm	Absorción Atómica	69.5	0.4 mg/Kg	N/A

OBSERVACIONES:

Abreviaturas:

N/A: No Aplica

Técnico Responsable

Directora de Calidad



Director Técnico

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de UDA LABORATORIOS.
El laboratorio mantendrá la confidencialidad de los resultados.



Anexo 3: Guía de operación del JIG del laboratorio de ingeniería en minas

3.1. Preparación del JIG

- Limpieza y eliminación de residuos de la caja del JIG
- Conexión de tuberías hacia la toma de agua
- Chequeo de válvulas de entrada y de salida

3.2. Preparación del material

- Si el material no ha pasado por un proceso de molienda, se recomienda realizarlo procurando que todas sus partículas queden de igual tamaño para facilitar el proceso de cribado.
- Eliminación de partículas mayores a 3 mm de diámetro
- Realizar una perfecta homogenización del material
- Dilución del material de alimentación en agua, en una relación 1:1

3.3. Corrección de variables

- En caso de procesar muestras con partículas de tamaños diferentes a 0,5 y 1 mm, se deberá tomar en cuenta que la relación del diámetro del orificio del nuevo tamiz respecto al diámetro del grano en la alimentación podrá variar desde 0,09 hasta infinito y la abertura de dicho tamiz sea igual a 3 veces el tamaño de la partícula mayor de la mena alimentada.
- Por su parte, el lecho del JIG deberá tener granos mínimo 2 veces la abertura de la criba.
- La cantidad de agua que entre al proceso dependerá exclusivamente del operador.

3.4. Operación

- Se abre la válvula de entrada de agua del equipo hasta que este se llene completamente.
- Se enciende el JIG.
- Una vez que el agua ya esté saliendo del equipo por rebose, se procede a verter el material uniforme y constantemente.
- Los minerales livianos (ganga) y el agua excedente saldrán por rebose del circuito por lo que se recomienda tener un recipiente y ubicarlo en la desembocadura del equipo.

- Transcurridos de 8 a 10 minutos (dependiendo del material), se procede a apagar el circuito.
- Se abre la válvula de salida del concentrado y este se desfoga.

3.5. Limpieza

- Una vez terminado el proceso y extraído todo el material, se procede a llenar de agua el equipo para limpiarlo, y esta se desfoga al mismo tiempo.