

**UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN-TACNA**

**Facultad de Ingeniería**

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE ORO ALUVIAL EN  
CONCENTRADOR FALCON EN LA COOPERATIVA  
MINERA LIMATA ANANEA - PUNO**

**TESIS**

Presentada por:

Bach. Miguel Gabriel Navarro Choque

Para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO METALURGISTA**

TACNA – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y  
MATERIALES

**ESTUDIO DE LA RECUPERACIÓN DE ORO ALUVIAL  
EN CONCENTRADOR FALCON EN LA  
COOPERATIVA MINERA LIMATA ANANEA – PUNO**

Tesis sustentada el 03 de octubre de 2016, estando integrado el Jurado

Calificador por:

PRESIDENTE

  
.....  
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez.

SECRETARIO

  
.....  
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

MIEMBRO

  
.....  
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

ASESOR

  
.....  
Ing. Daniel Jesús Zevallos Ramos

## **DEDICATORIA**

Dedicado a mis padres Vidal y Lucia, porque nunca perdieron las esperanzas en que llegase a concluir mis estudios, a mi tía Luisa y primo Mario y a mis hermanos Gladis y Mario por el apoyo en los momentos más difíciles de mi vida, personas quienes con su amor incondicional me han llevado a ser una mejor persona.

## **CONTENIDO**

CARATULA

Páginas del jurado

Página de **DEDICATORIA**

Página de **CONTENIDO**

Página de **ÍNDICE DE TABLAS**

Página de **ÍNDICE DE FIGURAS**

**RESUMEN**

**INTRODUCCIÓN**

### **CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

1.1 ANTECEDENTES	3
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 HIPÓTESIS	5
1.4 JUSTIFICACIÓN	6

### **CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO**

2.1 PROPIEDADES DEL ORO	8
2.2 MINERALES AURÍFEROS	10
2.3 DEPÓSITOS AURÍFEROS	12
2.4 MÉTODOS DE BENEFICIO	17
2.4.1 PROCESO DE FLOTACIÓN	17

2.4.2 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA	32
2.4.2.1 Mesas Concentradoras	36
2.4.2.2 Canaletas (Canaletas oscilantes “Rockers”)	43
2.4.2.3 Jib (Mecánico)	46
2.4.2.4 Espirales de Concentración	52
2.4.2.5 Concentrador Centrifugo	58

### **CAPÍTULO III: PROCESO DE EXTRACCIÓN DE ORO ALUVIAL MINERA LIMATA**

3.1 UBICACIÓN	86
3.2 GEOLOGÍA REGIONAL	87
3.2.1 Marco Geológico Regional	87
3.2.2 Geología Local	90
3.3 PLANTEAMIENTO DEL MINADO	95
3.3.1 Factores a considerar del Plan de Minado	95
3.3.2 Descripción del Proceso Actual	96
3.4 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS BANCOS	97
3.4.1 Configuración Geométrica de los Bancos	97
3.4.2 Métodos Artesanales	98
3.4.3 Método Monitoreo – Disgregación Hidráulica	99
3.4.4 Método de Minado en Seco	100
3.4.5 Topografía del Terreno	101
3.4.6 Selección del Método de Explotación	101
3.4.7 Operación o Explotación	102
3.4.8 Diseño del Tajo Abierto o a Cielo Abierto	102

3.4.9	Diseño del Minado	103
3.4.10	Descapero	104
3.4.11	Desbroce	105
3.4.12	Operaciones Unitarias	105
3.4.13	Arranque y Carguío con Excavadora	106
3.4.14	Transporte de Material Mineralizado	108
3.4.15	Transporte de Material Lavado	109
3.4.16	Proceso de Amalgamación	110
3.4.17	Refogado	112
3.5	COMPONENTES DEL TRATAMIENTO METALÚRGICO	113
3.5.1	Chute	113
3.5.2	Parrilla o Clasificador Grizzli	113
3.5.3	Canaletas o Sluices	114
3.5.4	Canaletas con rifle	115
3.5.5	Canaletas con alfombras	115
3.5.6	Desarenador	116
3.6	POZA DE LODOS	117
3.6.1	Poza de Sedimentación	118
3.6.2	Poza de Clarificación – Recirculación	118

#### **CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

4.1	PRUEBAS EXPERIMENTALES	120
4.2	UNIDADES LITOLÓGICAS	120
4.3	PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS	121

4.4 CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	122
4.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	123
<b>CAPITULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>128</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>131</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>134</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>136</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>139</b>

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Significado del criterio de concentración (CC)	35
Tabla 2: Alternativas para selección de concentradora espiral	56
Tabla 3: Especificaciones de modelos Falcón SB	78
Tabla 4: Especificaciones de modelos Falcón C	81
Tabla 5: Actividades de la etapa de operación	102
Tabla 6: Análisis granulométrico de gravas auríferas	121
Tabla 7: Análisis químico de la muestra de mineral	122
Tabla 8: Composición de la muestra	123
Tabla 9: Condiciones de operación	125
Tabla 10: Balance metalúrgico - concentrador Falcon	125
Tabla 11: Condiciones de operación	126
Tabla 12: Balance metalúrgico - concentrador Falcon	126
Tabla 13: Condiciones de operación	127
Tabla 14: Balance metalúrgico - concentrador de Canaletas	127
Tabla 15: Especificaciones del concentrador Falcón L-40	142



## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Mesa concentradora	42
Figura 2. Diagrama de flujo - Mesa concentradora	43
Figura 3. Diagrama de flujo – uso de Canaletas	46
Figura 4. Esquema simplificado de un Jibs	50
Figura 5. Diagrama de flujo – uso de Jibs	51
Figura 6. Esquema de Espiral (Humphreys)	56
Figura 7. Diagrama de flujo – uso de Espirales	58
Figura 8. Corte del cono del concentrador Knelson	68
Figura 9. Modelos de cono del concentrador Knelson	68
Figura 10. Flow sheet de oro aluvial – concentrador Knelson	73
Figura 11. Concentrador Falcon	75
Figura 12. Concentrador Falcón serie C	81
Figura 13. Comparación de concentrador Falcón serie C y SB	82
Figura 14. Flow sheet de oro aluvial – concentrador Falcón SB	82
Figura 15. Concentrador iCON	84
Figura 16. Flow sheet de oro aluvial – concentrador iCON	85
Figura 17. Diagrama de la ubicación de la mina Limata	87
Figura 18. Diseño de minado	103
Figura 19. Ciclo de operación de la mina Limata	106
Figura 20. Arranque y carguío con excavadora	108
Figura 21. Transporte de material mineralizado	109
Figura 22. Transporte de material morrenico lavado	110

Figura 23. Amalgamación	111
Figura 24. Flow sheet tratamiento de material aurífero aluvial	119
Figura 25. Mineral aluvial de la Cooperativa Limata	123
Figura 26. Equipo Falcón de laboratorio	124
Figura 27. Proceso alternativo del proceso de oro aluvial	139
Figura 28. Fotos del proceso de la Cooperativa minera Limata	140

## **RESUMEN**

La investigación que se realiza en el presente trabajo trata de la recuperación de partículas de oro libre mediante la concentración gravimétrica no tradicional utilizando para las pruebas experimentales el concentrador centrífugo Falcón, que según la bibliografía es un equipo más versátil y productivo con respecto a equipos tradicionales como por ejemplo el Jib, manejando parámetros de operación como: campo centrifugo, espesor de flujo (porcentaje de partículas).

El mineral utilizado para los estudios de investigación proviene de una de las zonas de la mina Limata, observándose mediante los resultados del análisis químico, que los minerales de esta zona de la mina son económicamente rentables.

Para obtener las muestras que sirvieron para el estudio se utilizaron mantas plásticas para la homogenización y cuarteo del mineral, sacando una muestra representativa a partir de 360 Kg de mineral de oro aluvial de la Cooperativa minera Limata Ananea.

La concentración gravimétrica con el concentrador centrífugo Falcón, presenta resultados atractivos en la recuperación del mineral en las

pruebas metalúrgicas. Siendo los resultados los siguientes: De acuerdo a los resultados se incrementó la extracción del oro de un 35,71 % a 64,43 % logrando incrementar la producción hasta un 28,72 % obteniendo mejoras económicas para la zona de producción.

**Palabras claves:** Oro aluvial, concentrador centrífugo, concentrado, relave.

## INTRODUCCION

El oro aluvial o procedente de los lavaderos o ríos es un importante generador de fuentes de trabajo y de riqueza. Actualmente para su beneficio se usa métodos artesanales y en algunos casos maquinaria pesada, pero con resultados muy pobres con recuperaciones menores al 40 %. Por lo que una parte del oro que ya ha sido trabajado, por deficiencias y desconocimiento de otros métodos se pierde en los relaves. En este trabajo de investigación se verá algunos procesos alternativos al uso de canaletas, como son los concentradores centrífugos. También se estudia algunos parámetros como es la granulometría de la grava y del oro en particular, para recomendar el método más conveniente y apropiado para optimizar los resultados metalúrgicos.

Para que el trabajo de investigación sea más didáctico en su comprensión se ha dividido en cinco capítulos, siendo el primer capítulo referente a generalidades de la tesis, antecedentes, objetivos, hipótesis y justificación, el segundo capítulo se trata sobre Fundamentos teórico de la investigación concentración gravimétrica tradicional y concentradores centrífugos donde se toca básicamente el concentrador Falcón, el tercer

capítulo referente al proceso de extracción de oro aluvial de la cooperativa minera Limata Ananea, el cuarto capítulo relativo a las pruebas experimentales a nivel de laboratorio, el quinto capítulo es referente al análisis y discusión de los resultado, finalizando con las conclusiones, recomendaciones, las referencias bibliográficas y los anexos.

## **CAPITULO I**

### **GENERALIDADES**

#### **1.1 ANTECEDENTES**

El Perú es un país minero. Esta actividad representa aproximadamente entre el 40 y el 50 % del producto de exportación. Su participación en la minería mundial destaca como producto de primer nivel en zinc, plata y estaño y, en menor escala, en plomo, cobre y oro.

En los últimos 6 años, se ha vivido una etapa de apertura a la economía global y a las inversiones, lo cual está conduciendo a la presencia de capitales, privados, tanto nacionales como extranjeros, en las diferentes etapas de la actividad minera.

La Región de Puno se caracteriza por presentar tal cantidad y variedad de depósitos metálicos como ninguna otra región del Perú. Esta mineralización está estrecha e íntimamente relacionada a la

geología de la región, ciclos orogénicos, magmáticos y tectónicos que ocurren tanto en la Cordillera Occidental, así como en la Cordillera Oriental.

No menos importante es la mineralización de oro estrato-ligada de Ananea, única en su género en el país, cuyas reservas parecen inagotables por las décadas de explotación en este lugar. Además, existen depósitos detríticos morrénicos fluvio-glaciales de oro con reservas probadas como el de San Antonio de Poto y paleoplaceres como la Cooperativa Limata, ellos con reservas de más de un millón de onzas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **Objetivo General:**

El objetivo de este trabajo es estudiar la recuperación de oro aluvial mediante gravimetría usando el concentrador centrífugos Falcón.



## **Objetivos Específicos**

1. Estudiar la evaluación de los equipos adecuados para el tratamiento oro aluvial.
2. Evaluar del proceso actual en la recuperación del oro aluvial.
3. Contribuir a mejorar las condiciones económicas de la zona donde se extrae el oro aluvial.
4. Optimizar la extracción del oro por mejoras en los métodos de tratamiento.

## **1.3 HIPOTESIS**

Es posible, tratar los minerales de oro de la mina “Limata” por concentración gravimétrica mediante el uso de concentradores Falcón.

### **Hipótesis específicas:**

La recuperación mínima que se puede obtener en el tratamiento de los minerales de oro de la Cooperativa “Limata” por concentración gravimétrica en los Concentradores Falcón es del 64 %.

Los parámetros de operación más importantes que se influyen en el rendimiento de los concentradores Falcon son: campo centrífugo, el porcentaje de sólidos o el flujo.

#### **1.4 JUSTIFICACION**

En estos momentos actuales donde la explotación y procesamiento de minerales auríferos como también los de plata son económicamente rentable, pequeñas empresas han reactivado sus operaciones mineras, esto ha producido una gran demanda y consumo de cianuro a nivel mundial, teniendo en consideración la toxicidad del cianuro a pesar de que el cianuro libre se descompone rápidamente cuando está expuesto a la luz del sol, este produce grandes descargas nocivas al medio ambiente, pero tecnologías ya conocidas como es la concentración gravimétrica que no requiere del cianuro, reduce contaminar nuestro medio, por lo tanto el presente proyecto está orientado a determinar a nivel de laboratorio el uso de los concentradores gravimétricos en especial el concentrador falcón y los parámetros más óptimos para lograr la máxima recuperación posible del oro con el objetivo final de tener una recuperación metalúrgica alta y optima de estos minerales y de esta manera se pueda dar viabilidad

a la extracción y su posterior tratamiento metalúrgico y de esa manera dar rentabilidad a el procesamiento de estos minerales, por lo expuesto estamos convencidos que estamos dando la iniciativa para que se pueda viabilizar la extracción y el procesamiento de estos minerales de oro y evitar el consumo de reactivos nocivos para el medio ambiente como es el caso de cianuro; por lo tanto como el trabajo está orientado a ello entonces su desarrollo queda plenamente justificada.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTOS TEORICOS

#### 2.1 PROPIEDADES DEL ORO

**Propiedades físicas.** El oro se halla en la naturaleza en una proporción bajísima. Es un metal de color amarillo característico, blando, muy dúctil y maleable, pues puede reducirse a láminas hasta una diezmilésima de milímetro de espesor (pan de oro); en la escala de dureza de Mohs está entre 2,5 y 3 y posee una gravedad específica de 19,3 g/L. Es inalterable frente a los agentes atmosféricos y solo es atacable por muy pocos agentes químicos, como el cloro, el bromo, el agua regia, el mercurio y el cianuro de sodio en presencia de oxígeno.

**Composición y estructura.** Entre el oro y la plata, existe una serie completa de soluciones sólidas y la mayor parte del oro contiene plata. El oro de California, contiene de 10 a 15 % de plata y cuando este último elemento está en proporción mayor del 20 %, la aleación

es llamada electro. En el caso de la mina Koricolqui, la plata se encuentra como electrum y como pirargirita, y parte del oro se encuentra amarrado al cuarzo por lo que requiere mayor liberación y otra parte se encuentra fino por lo que no debe sobre molerse.

**Diagnóstico.** El oro se distingue de otros sulfuros amarillos (particularmente la pirita y la calcopirita) y de las pajuelas amarillas de mica alterada por su ductibilidad y gran peso específico. Se funde fácilmente a 1336 K.

**Yacimiento.** Aunque el oro es un elemento raro, aparece en la naturaleza diseminado en pequeñas cantidades. Se halla corrientemente en filones que tienen relación genética con rocas ígneas de tipo silíceo. Gran parte aparece como metal nativo, siendo el telurio y posiblemente, el selenio los únicos elementos que se le combinan en la naturaleza. La principal fuente de oro son los llamados filones hidrotermales de cuarzo y oro, donde junto con la pirita y otros sulfuros, el oro fue depositado por soluciones minerales ascendentes que lo contenían. El oro está simplemente mezclado mecánicamente con los sulfuros y no en forma de combinación

química alguna. En la superficie terrestre y cerca de ella, los sulfuros que contienen oro normalmente están oxidados, dejándolo libre y haciendo así su extracción muy fácil. En la mayoría de los filones, el oro está finamente bien dividido y distribuido de forma tan uniforme, que su presencia no puede ser detectada por simple inspección. Los filones que contienen oro, sometidos a la acción del tiempo y meteorizados, liberan el oro que, o bien queda en el manto del suelo, arenas fluviales, o es arrastrado a los arroyos vecinos para formar placeres. Debido a su gran peso específico, el oro se separa mecánicamente de los materiales más ligeros, de las arenas y lechos de la corriente.

**Empleo.** El principal empleo del oro se da en joyería, instrumentos científicos, placados electrolíticos, pan de oro, prótesis dentales y en lingotes de inversión.

## **2.2 MINERALES AURÍFEROS**

Los depósitos del mineral de oro se pueden clasificar en los grupos:

Veneros de oro-cuarzo; depósitos epitermales, placeres jóvenes, placeres fósiles; depósitos con oro diseminado; oro en menas de metales no ferrosos; oro en agua de mar.

- ***Menas de Oro Nativo***: En las cuales el metal precioso puede ser removido por separación gravimetría, amalgamación, cianuración y sales oxidantes.
- ***Oro Asociado a Sulfuros***: Están presentes como partículas libres o diseminadas en el sulfuro. Las piritas auríferas con oro finamente diseminado en su matriz son bastante comunes. La piritita es relativamente estable en cianuros, en medio de sales oxidantes es disuelto y favorece el proceso por la formación de iones férrico. La pirrotita se disuelve y consume cianuro.
- ***Teluros de Oro***: Se encuentra el oro en forma nativa y sulfuros del mismo. La calaverita es un mineral que contiene cerca del 40 % de oro, la silvanita contiene 25 % de oro con 13 % de plata.

- **Oro con otros Minerales:** Se presenta con arsénico y antimonio con trazas de cobre, selenio y telurio así como plomo, cinc y materias carbonáceas.

### 2.3 DEPÓSITOS AURÍFEROS

Para el caso de la Mina Koricolqui su mineral corresponde al grupo de depósitos de oro en cuarzo y cuarcitas encontrándose el metal valioso en forma libre.

Se distingue diez tipos de depósitos auríferos:

- **Dique aurífero porfirítico, cuerpos graníticos escasamente vetados:**

El contenido de oro en estas rocas graníticas es bajo, en el orden de 3 ppm. Determinadas en diques porfiríticos de cuarzo feldespató y rocas con pirita in situ y/o pirrotita pueden contener hasta 0,1 ppm de oro.



- ***Cuerpos carbonatados y relativamente carbonatadas:***

Son bajas en oro y plata 0,005 y 0,1 ppm respectivamente. Muy pocos carbonatos están debidamente enriquecidos en oro y plata como para ser considerado cuerpos mineralizados rentables. Solamente las fases sulfuradas, si existieran en rocas carbonatadas, enriquecidas en oro y plata, podrían ser consideradas como posibles depósitos de oro.

- ***Depósitos auríferos:***

Contienen silicatos antiguos de *Ca-Fe-Mg* y minerales oxidados, junto con silicatos frescos, carbonatados, azufres, sulfuros y minerales de arsénico. El oro está en su forma nativa o como telurio. Los elementos más frecuentes enriquecidos con oro en estos depósitos son: *Fe, S, Cu, Ag, Zn, Pb, Mo, As, Bi y Te*. Existen trazas de tungsteno en los depósitos mineralizados de oro.

- ***Veneros de oro-plata, fisuras mineralizadas hacia abajo y cuerpos irregulares silificados en fracturas y fallas:***

Estos depósitos ocurren en rocas de todas las edades, pero principalmente en aquellas pertenecientes a las eras precámbrico y terciario.

La mineralización de estos depósitos en particular está compuesta claramente de: cuarzo, carbonatos, pirita, arsenopirita, sulfuros de metales bases y sulfosales. Los principales minerales de oro son: oro nativo y teluros; la auroestibina aparece en algunos depósitos. Los depósitos incluyen los elementos concentrados: *Cu, Ag, Zn, Cd, Hg, B, Ti, As, Bi, V, Se, Te, S, Mo, W, Mn y Fe* en la forma de carbonatos y/o silicatos.

- ***Veneros auríferos y venas estratificadas:***

Se desarrollan principalmente en secuencias de arcillas y areniscas de origen marino.

Algunos depósitos de valor económico, se encuentran en los batolitos graníticos que invaden las secuencias de pizarras. En estos depósitos, el principal mineral está como ganga en el cuarzo. También están presentes la galena, escalerita, calcopirita y pirrotita. Los minerales valiosos en estas menas son: oro nativo con bajo contenido de plata, pirita y arsenopirita aurífera.

- ***Veneros de oro-plata, zonas silicificadas con rocas sedimentarias y volcánicas:***

La ganga predominante es el cuarzo, con algunos depósitos con contenidos moderados de carbonatos. Estos cuerpos mineralizados son principalmente venas de cuarzo, vetas y zonas carbonatadas y salificadas. El oro está principalmente libre, pudiendo estar también como teluro y diseminado en pirita y arsenopirita. La relación de Au/Ag varía notablemente de acuerdo al lugar de análisis.

- ***Depósitos diseminados de oro-plata, en rocas ígneas, volcánicas y sedimentarias:***

Se pueden reconocer tres tipos:

- a) Depósitos diseminados de oro-plata en estratos ígneos.
- b) Depósitos oro-plata, diseminados en flujos volcánicos y asociados a rocas volcánicas
- c) Depósitos de oro-plata diseminado en lechos volcánicos y sedimentarios.

- ***Depositados de oro en cuarzo y cuarcitas:***

Constituyen las minas más grandes y productivas de oro, alcanzando un 50 % de la producción mundial. Estos depósitos están marcados por la presencia de abundante pirita y hematina junto con trazas de sulfuros, arseniuros y minerales de uranio. En los conglomerados de cuarcita está presente oro nativo muy fino < 0,08 mm.

- ***Placeres aluviales y eluviales:***

Producen pepas y arenas de oro con un bajo contenido de plata. Minerales pesados como monacita, suelita y cinabrio, así también metales del grupo del platino, pueden acompañar al oro aluvial y fluvial.

- ***Otras fuentes de oro:***

En este tipo está incluido la calcopirita, sulfuros de cobre-níquel, pirita, arsenopirita, otros sulfuros de metales bases, seleniuros, arseniuros y sulfosales. El oro sigue a los metales base durante la fusión, y es recuperado de las lamas, lodos, producidos durante la electrorefinación del metal base.

## **2.4 MÉTODOS DE BENEFICIO**

### **2.4.1 PROCESO DE FLOTACIÓN**

La flotación en espuma, aprovecha las diferencias en las propiedades fisicoquímicas de la superficie de las partículas

minerales. Después del tratamiento con reactivos, las diferencias en las propiedades superficiales de los minerales que contiene la pulpa de flotación son aparentes. Para producirse tal proceso, una burbuja de aire se debe unir a una partícula de mineral y ser elevada hasta la superficie del agua. El proceso se aplica únicamente a partículas relativamente finas ya que, si son demasiado grandes, la adhesión entre la partícula y la burbuja será menor que el peso de la partícula, por lo tanto la burbuja deja caer su carga.

En la concentración por flotación, el mineral normalmente es transferido a la espuma o fracción flotante, dejando la ganga en la pulpa o las colas. Las burbujas de aire solamente se pegan a las partículas minerales si estas desplazan agua de la superficie mineral, lo cual únicamente sucede si el mineral repele en cierta medida al agua o es hidrofóbico. Una vez que las burbujas de aire que alcanzan la superficie, únicamente pueden continuar sosteniendo la partícula mineral si forman una espuma estable, de otro modo revientan y cae la partícula mineral.

Para alcanzar estas condiciones, es necesario usar los numerosos reactivos químicos conocidos como reactivos de flotación.

La flotación del oro puede hacerse en el metal nativo, telurio o minerales asociados al oro, principalmente sulfuros de cobre, plomo y arsenopirita. Los minerales de oro pueden clasificarse en 3 grupos generales respecto a la flotación:

- Minerales que no se prestan a la flotación, o que pueden tratarse más fácilmente por otros procedimientos.
- Minerales que se tratan fácilmente por flotación, así como el oro libre y minerales en los cuales el oro está asociado con otros compuestos metálicos.
- Minerales que requieren la combinación de varios procedimientos. La flotación se aplica en este caso de varios modos: flotando los minerales refractarios, dando a una pequeña parte del mineral primitivo un tratamiento especial. La flotación se usa también para separar las cianicidas, así como otras sustancias que son perjudiciales para la cianuración como el cobre el carbón grafito y otros elementos.

La flotación del oro libre requiere la extracción preliminar de las fracciones de tamaños mayores por concentración gravimétrica (el oro mayor de 0,2 mm. Debe extraerse antes de la flotación). El tamaño límite de las partículas a flotar depende de las formas de las partículas y de sus superficies.

La mayor parte de los minerales en estado natural no son repelentes al agua y por tanto conviene agregar reactivos de flotación a la pulpa. Los reactivos más importantes son los colectores, los cuales son adsorbidos sobre las superficies de los minerales y los convierte en hidrofobitos (aerofílicos) facilitando su adhesión a la burbuja. Los espumantes ayudan a mantener una espuma razonablemente estable. Los reguladores se usan para controlar el proceso de flotación, activando o deprimiendo la adherencia de las partículas minerales a las burbujas de aire y también se utilizan para controlar el pH del sistema.

### **Colectores**



Todos los minerales se clasifican en tipos no polares o polares según sus características superficiales.

La superficie de los minerales no polares, se caracteriza por enlaces moleculares relativamente débiles. Los minerales están compuestos de moléculas covalentes que se mantienen juntas por las fuerzas de Van der Waals; las superficies no polares no se unen fácilmente a los dipolos del agua y como consecuencia resultan hidrofóbicas.

Los minerales con un fuerte enlace superficial covalente o iónico, se conocen como de tipo polar y exhiben altos valores de energía libre en la superficie polar. Las superficies polares reaccionan fuertemente con las moléculas de agua y estos minerales son naturalmente hidrofílicos.

Para flotar los minerales se les debe impartir cierta calidad hidrofóbica, lo cual se logra agregando surfactantes a la pulpa. Los que se conocen como colectores y el tiempo concedido para la adsorción durante la agitación se conocen como periodo de acondicionamiento. Los colectores son compuestos orgánicos

que convierten a los minerales seleccionados en repelentes al agua por la adsorción de moléculas o iones sobre la superficie mineral, reduciendo la estabilidad de la capa hidratada que separa la superficie mineral de la burbuja de aire, hasta un nivel tal que la adhesión de la partícula a la burbuja puede hacerse por contacto.

Las moléculas de colector pueden ser compuestos ionizados, los cuales se disocian en iones dentro del agua, o compuestos no ionizados que son prácticamente insolubles y vuelven repelente al agua del mineral cubriendo su superficie con una delgada capa.

Los colectores ionizados, se clasifican de acuerdo con el tipo de ion, anión, catión, que produce el efecto de repulsión al agua dentro de ella.

Debido a la atracción química, eléctrica o física entre las porciones polares y los sitios de la superficie, los colectores se adsorben sobre las partículas con su extremo no polar orientado

hacia la masa de la solución, impartiendo de este modo características hidrofóbicas a las partículas.

En general, los colectores se usan en pequeñas cantidades, solo las necesarias para formar una capa monomolecular sobre la superficie de la partícula, ya que al aumentar la concentración aparte del costo, tiende a flotar otros minerales, reduciendo la selectividad. Siempre es más difícil eliminar el colector ya adsorbido que evitar su adsorción.

Una concentración excesiva de un colector, también puede tener un efecto adverso sobre la recuperación de los minerales valiosos, posiblemente debido al desarrollo de multicapas de colector sobre las partículas reduciendo la proporción de radicales hidrocarburos orientados hacia la masa de solución. De este modo, se reduce la hidrofobicidad de las partículas y por tanto, su capacidad de flotación. El límite de flotación se puede extender sin perder la selectividad, usando un colector de hidrocarburo con una cadena más grande, produciendo de ese modo una mayor repulsión al agua que si se aumentara de un colector de cadena más corta.

El colector agregado a la cabeza del sistema de flotación, normalmente es relativamente fuerte y no selectivo para promover una recuperación máxima. Muchas veces se agrega un colector más débil, más selectivo al concentrado primario para mejorar el concentrado final que se produzca.

Cabe resaltar que los colectores empleados para la flotación del mineral de Minera Koricolqui fueron el Z-11, el CYTEC Rag 3418 y el CYTEC Rag 3, los cuales mostraron resultados satisfactorios en el proceso empleado.

### **Colectores Aniónicos:**

Son los colectores que más se usan en la flotación de minerales y se pueden clasificar en dos tipos de acuerdo a la estructura del campo polar.

**Los colectores oxidrilo:** Que tienen como grupos polares aniones orgánicos y sulfa-ácidos y que, como en todos los colectores aniónicos, no presentan al catión como interventor

importante en la reacción reactivo - mineral. Los colectores oxidrilo en general son ácidos orgánicos o jabones.

**Los xantatos** son los más importantes para la flotación de minerales sulfurados y se preparan haciendo reaccionar un hidróxido alcalino, un alcohol y un bisulfato de carbón:



Dónde: R hidrocarburo que normalmente contiene de uno hasta seis átomos de carbono; los xantatos que más ampliamente se usan son el etilo, isopropílico, isobutílico, amílico y hexílico. La reacción entre los minerales sulfurados y los colectores sulfhídricos es compleja. Se asume que los xantatos son adsorbidos sobre las superficies de los minerales sulfurados debido a fuerzas químicas entre el grupo polar y la superficie, resultado en xantatos insolubles de metal fuertemente hidrofóbicos.

También se propusieron los mecanismos que implican la formación y adsorción del dixantógeno, ácido xántico, etc. y se demostró que el sulfuro no se une a los aniones del colector sin

la acción previa del oxígeno. Se considera que la reacción del xantato con los productos de la oxidación de la superficie de sulfuro a través de un proceso de intercambio iónico es el mayor mecanismo de adsorción para la flotación de los sulfuros. Sin embargo, un alto grado de oxidación superficial, acompañado de la formación de sulfatos que reaccionan rápidamente con los xantatos, o previene o impide la flotación, puesto que los xantatos metálicos así formados escaman el mineral.

Los xantatos normalmente se usan en pulpas débilmente alcalinas puesto que se descomponen en medio ácido y a valores altos de pH, los iones hidroxilo desplazan a los iones xantatos de la superficie mineral.

Los ditiofosfatos no se usan tanto como los xantatos, pero en la práctica son reactivos importantes. Son colectores comparativamente débiles pero dan buenos resultados en combinación con los xantatos. Parece que la repulsión al agua conferida a la superficie mineral se debe a la formación de un producto de oxidación del colector ditiofosfato el cual se adsorbe sobre la superficie mineral. De este modo, como en los xantatos,

la presencia de oxígeno u otro agente oxidante, es indispensable para la flotación. Las fuertes condiciones oxidantes destruyen las sustancias hidrofóbicas y por ese motivo son indeseables, mientras que la oxidación misma de la superficie mineral puede impedir la adsorción del colector. Se considera que para el avance futuro de la teoría de la flotación, es indispensable conocer las características de la oxidación del mineral y del colector así como sus propiedades eléctricas.

### **Espumantes**

Cuando las superficies minerales se vuelven hidrofóbicas por el uso del colector, la estabilidad de la adhesión de la burbuja, especialmente en la superficie de la pulpa, depende en gran parte de la eficiencia del espumante.

El comportamiento ideal del espumante ocurre totalmente en la fase líquida y no influye sobre el estado de la superficie del mineral. Sin embargo, en la práctica, hay una interacción entre el espumante, el mineral y otros reactivos; la selección de un espumante apropiado para una mena en particular solamente se

puede hacer después de un amplio trabajo de prueba. En la flotación de minerales sulfurados es práctica común emplear al menos dos espumantes y más de un colector. Los espumantes específicos se seleccionan para proporcionar las propiedades físicas adecuadas a la espuma, mientras que el segundo espumante interactúa con los colectores para controlar la dinámica del proceso de flotación.

Los espumantes generalmente son reactivos orgánicos de superficie activa heteropolar, capaces de ser adsorbidos en la interfase aire-agua. Cuando las moléculas de superficie activa reaccionan con el agua, los dipolos de agua se combinan rápidamente con los grupos polares hidratándolos, pero prácticamente no hay reacción con el grupo de hidrocarburo no polar, pues la tendencia es forzar al último hacia el interior de la fase aire. De este modo la estructura heteropolar de la molécula de espumante lleva a su adsorción, es decir, las moléculas se concentran en la superficie con los grupos no polares orientados hacia el aire y los grupos polares hacia el agua.



De este modo la acción espumante, se debe a la habilidad del espumante para adsorberse sobre la interfase aire-agua. Debido a su actividad superficial también es capaz de reducir la tensión superficial, estabilizando así la burbuja de aire.

Los espumantes deben ser hasta cierto grado solubles en agua, de otra manera se distribuyen muy irregularmente en una solución acuosa y sus propiedades de activador de superficies no resultan completamente efectivas. Los ácidos, aminas y alcoholes son los más solubles espumantes.

Los alcoholes (- OH) se usan más ya que prácticamente no tienen propiedades colectoras y en este aspecto se prefieren en lugar de otros espumantes, como los carboxilos, que son colectores poderosos. La presencia de propiedades colectoras y espumantes en el mismo reactivo dificulta la flotación selectiva.

El aceite de pino que contiene alcoholes aromáticos cuyo componente espumante más activo es el terpinol, se usa ampliamente como espumante. El Cresol también se usa

mucho. El carbinol isobutil metil (MIBC) es un espumante de múltiples usos.

Otros tipos de espumantes sintéticos se basan en los éteres de poliglicol y resultan muy efectivos. Se venden con varios nombres tales como Dowfroth 250, Cyanamid R-65 y el Unión Carbide PG-400.

### **Reguladores**

Los reguladores o modificadores se usan mucho en flotación para modificar la acción del colector, ya sea intensificando o reduciendo el efecto repelente al agua sobre la superficie mineral para de esa manera hacer más selectiva la acción del colector hacia ciertos minerales. Los reguladores se pueden clasificar como activantes, depresores o modificadores del pH.

**Activadores.** Estos reactivos alteran la naturaleza química de las superficies del mineral de tal modo que se convierten en hidrofóbicos debido a la acción futura del colector. Los

activadores generalmente son sales solubles que se ionizan en solución y los iones reaccionan entonces con la superficie del mineral.

**Depresores.** La depresión se usa para incrementar la selectividad de la flotación volviendo hidrofílicos (ávidos de agua) a ciertos minerales y evitando así su flotación. Existen muchos tipos de depresores cuyas acciones son complicadas y variadas, y que en la mayoría de los casos se conocen poco, lo que dificulta controlar la depresión más que si se aplicaran otros tipos de reactivos. El recubrimiento de lama es un ejemplo de una forma de depresión que se presenta naturalmente. En una mena triturada y molida las lamas dificultan la flotación, ya que recubren a las partículas de mineral, retardando la adsorción del colector.

#### **2.4.2 CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA**

La concentración por gravedad es, esencialmente, un método para separar partículas de minerales de diferente peso específico debido a sus diferencias de movimiento en respuesta a las acciones que ejercen sobre ellas, simultáneamente, la

gravedad u otras fuerzas. Se acepta generalmente que la concentración por gravedad es el más sencillo y más económico de los métodos de concentración. El uso de este tipo de separación está recomendado siempre que sea practicable porque permite la recuperación de mineral útil en un orden de tamaños tan gruesos como sea posible, reduciendo los costos inherentes a la reducción de tamaño y disminuyendo las pérdidas asociadas a estas operaciones.

En general, los métodos de separación por gravedad se agrupan en tres categorías principales: a) **Separación por medios densos**, en el cual las partículas se sumergen en un baño que contiene un fluido de densidad intermedia, de tal manera que algunas partículas floten y otras se hundan; b) **Separación por corrientes verticales**, en la cual se aprovechan las diferencias entre velocidades de sedimentación de las partículas pesadas y livianas, como es el caso del jig; y c) **Separación en corrientes superficiales de agua o “clasificación en lámina delgada”**, como es el caso de las mesas concentradoras y los separadores de espiral.

La concentración gravimétrica es la más adecuada para la minería en pequeña escala, porque no usa reactivos de ningún tipo es generalmente de fácil manejo, tiene costos de operación bajas, sirve para una gran variedad de minerales (oro, wolframita, tantalita, cassiterita, sulfuros, diamantes, etc.), tiene una variedad de equipos de todo tamaño y capacidad, el agua del proceso puede ser reciclado después su clarificación.

### **Criterio de concentración**

El criterio de concentración (CC) es usado en una primera aproximación y entrega una idea de la facilidad de obtener una separación entre minerales a través de procesos gravitacionales, sin considerar el factor de forma de las partículas minerales. El criterio de concentración originalmente sugerido por Taggart, con base en la experiencia industrial aplicado a la separación de dos minerales en agua, es definido por la siguiente expresión:

$$CC = (D_h - D_f)/(D_l - D_f) \quad [2]$$

Dónde:

$D_h$  = densidad del mineral pesado.

$D_l$  = densidad del mineral liviano.

$D_f$  = densidad del agua.

Para la wolframita y cuarzo, por ejemplo, el criterio de concentración tendrá el siguiente valor:

$$CC = (7,5 - 1) / (2,65 - 1) = 3,94 \quad [3]$$

La Tabla 1 muestra la relación entre el criterio de concentración y la facilidad de realizar una separación gravitacional.

Tabla 1

*Significado del criterio de concentración (CC).*

<b>CC</b>	<b>Significado</b>
> 2,5	Separación eficiente hasta malla 200
2,5 – 1,75	Separación eficiente hasta malla 100
1,75 – 1,50	Separación posible hasta malla 10, sin embargo, es difícil
1,50 – 1,20	Separación posible hasta 0,635 cm sin embargo es difícil

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez 2005. Criterios de concentración. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 6 –107). Chile.

De acuerdo a algunos investigadores, el criterio de concentración puede ser muy útil si la forma de las partículas fuera considerada, en caso contrario, sorpresas desagradables en cuanto a la eficiencia del proceso se pueden verificar en la práctica.

De cualquier modo, la Tabla 1 indica la dificultad de alcanzar una separación eficiente cuando se tratan fracciones inferiores a malla 200 (0,074 mm). Debe señalarse, que el criterio de concentración fue sugerido en base a equipamientos que operan bajo la fuerza de gravedad, por lo tanto, la introducción de la fuerza centrífuga amplía la posibilidad de una separación más eficiente con materiales finos y ultrafinos.

Los equipos de concentración gravimétrica más aptos para la minería en pequeña escala son:

- Mesas concentradoras
- Canaletas (canelones, lavaderos, tames, etc.)
- Jigs

- Espirales
- Concentradores centrífugos.

#### **2.4.2.1 Mesas concentradoras**

Las mesas concentradoras son aparatos de concentración gravimétrica con flujo laminar sobre una superficie inclinada. Aquí se habla principalmente de los tipos con movimiento longitudinal vibratorio, donde las partículas de mineral se diferencian formando bandas en abanico (cejas), según su peso específico (y la granulometría). Otros tipos de mesas (mesas de banda, mesas basculantes, mesas de paño sin fin, mesas redondas, etc.) son raramente usadas en la pequeña minería y por esto no se describen aquí en detalle.

La mesa con movimiento longitudinal vibratorio (mesa vibradora) está muy difundida principalmente en la minería del wolframio, estaño y oro.



Existen de diferentes tipos y marcas. En la minería wolframio se usan especialmente los tipos Wilfley y Deister (ver Figura 1). Las diferencias entre unas y otras son mínimas, principalmente en el mecanismo del cabezal, la geometría del tablero y el tipo de enriflado, se encuentra en algunas minas también mesas tipo "Gemini".

De acuerdo a su modelo y tamaño, las mesas se utilizan para concentrar minerales finos y ultrafinos con una capacidad hasta un máximo de 1,5 t/h por unidad.

Las mesas vibradoras permiten una amplia variación en sus parámetros operativos y, de esta forma, se pueden adaptar al material de alimentación correspondiente. Debido a que el proceso de concentración se lleva a cabo a la vista sobre el tablero de la mesa, cualquier cambio en los parámetros (inclinación longitudinal y transversal, cantidad de agua, etc.) resulta en cambios en el comportamiento del material, que pueden ser visualizados inmediatamente.

Se pueden tomar muestras directamente durante la operación, utilizando bateas para oro, por ejemplo. Por lo tanto, la optimización de esta operación se lleva a cabo de una manera simple y puede ser realizada por operadores aprendices.

Debido a la distribución del material en forma de un abanico sobre la tabla de la mesa, uno puede obtener bandas específicas de mineral de una manera selectiva (algo que no ocurre en las espirales, donde las bandas se superponen parcialmente unas sobre otras). De esta manera, uno puede separar, al realizar la regulación correspondiente, un concentrado de oro libre de alta riqueza, así como un concentrado de sulfuros, por ejemplo, que contiene oro diseminado, para su posterior tratamiento. Esto implica, por otro lado, que es muy fácil robar el concentrado de alta ley cuando se utilizan las mesas para la fase de limpieza de los minerales.

La efectividad de todas las mesas depende de la homogeneidad del material de alimentación y de la

densidad de pulpa, particularmente de la densidad, ya que cualquier fluctuación altera las condiciones de transporte del agua hacia afuera de la corriente.

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)
- Gran flexibilidad
- Manejo y supervisión relativamente simple (t/h)
- Posibilidad de recuperar otros minerales valiosos acompañantes
- Alta seguridad en las condiciones de trabajo
- Buena recuperación y un alto índice de enriquecimiento, poco uso de agua y energía
- Posibilidad de su producción en países en desarrollo.

Desventajas:

- Precio relativamente alto (en relación a su capacidad)
- Requiere alimentación constante (si no, la posición de las cejas Varían demasiado sobre el tablero)
- Requiere supervisión continua
- Requiere motor

#### Variables de operación

- Entre las más importantes se mencionan:
- Granulometría de la alimentación
- Longitud de golpe (amplitud)
- Frecuencia de golpe
- Inclinación de la mesa
- Cantidad de agua de lavado
- Posición de los cortadores de productos.

#### Posibilidades de aplicación:

Principalmente se puede usar en la minería aurífera filoniana (vetas), para la recuperación de oro

fino y muchas veces para la recuperación de piritas auríferas como subproducto comerciable. Este último constituye además un contaminante cuando se descarta en las colas a los ríos y lagunas; su separación o recuperación significa una valiosa contribución a los propósitos de mitigación de este impacto ambiental y un ingreso adicional. Ver Figura 2.

Las mesas sirven también para enriquecer preconcentrados gravimétricos obtenidos por otros equipos (canaletas, espirales, etc.) y para producir concentrados de alta ley (que en algunos casos se pueden fundir directamente).

Las mesas se pueden fabricar localmente en talleres metal-mecánicos (mecanismo) y de carpintería (tableros).

El tamaño del mineral que se puede alimentar a las mesas depende de la diferencia de densidades que exista entre la ganga y el mineral útil. Se pueden tratar desde 10 mm (3/8 pulgadas) hasta la malla 270 (0,053

mm) de la serie USA o ASTM. No se debe alimentar con partículas mayores que la altura de sus listones o que la tercera parte de la separación entre estos.



Figura 1. Mesa concentradora  
Fuente: (SE, s.f.), 2015. Mesa concentradora. Recuperado de: <https://www.savonaequipment.com>

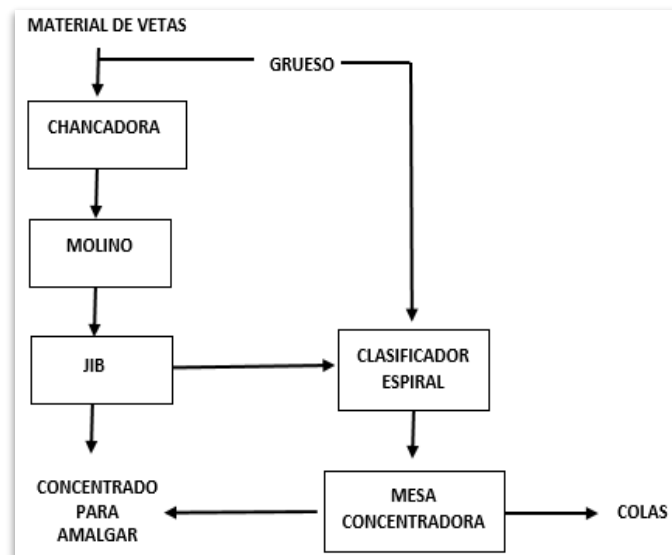


Figura 2. Diagrama de flujo considerando mesa concentradora  
Fuente: Alguacil, F.J. (1995). El refinado del oro. Revista de metalurgia, editorial CSIC.

#### 2.4.2.2 Canaleta (Canaletas oscilantes (Rockers))

Las canaletas oscilantes o "rockers" sirven para la concentración de oro aluvial, sobre todo en regiones relativamente secas, por su bajo consumo de agua. Básicamente, una canaleta oscilante consiste de un clasificador y una canaleta. El clasificador es un cajón tipo tolva que recibe la carga de mineral. Por debajo del cajón emerge una canaleta inclinada de madera con rejillas, cuya gradiente varía de acuerdo al tamaño del material alimentado.

El material arcilloso alimentado requiere menos gradiente que la que podría necesitarse para un material más grueso. El total de la unidad se monta en patines semicirculares (los "osciladores"), para que toda la sección superior pueda ser mecida de un lado a otro con la ayuda de una palanca. Debido a que el material de carga y el agua de lavado deben ser agregados manualmente, se requieren varias personas para aprovechar la capacidad de una criba oscilante: una para extraer el mineral bruto, otra para transportarlo a la criba oscilante y descargarlo a una tolva, una para

sacudir la criba oscilante, y otra para añadir el agua (pero también se puede utilizar una manguera). La criba oscilante típica puede manejar entre 3 y 5 m<sup>3</sup> de carga en un turno de 10 horas. Los preconcentrados de las cribas oscilantes requieren seguidamente un proceso de separación con bateas. De 3 a 5 m<sup>3</sup> de agua son consumidos durante el turno de trabajo promedio. Las principales ventajas de las cribas de lavado son su poco consumo de agua, construcción liviana, que no necesita, un motor, y su fácil manufactura local - haciendo que su uso sea apropiado como mecanismo de concentración portátil.

Sin embargo, se puede usar también canaletas "normales" con poca agua y buenos resultados. Ver Figura 3.

**Ventajas:**

- Muy bajo costo.
- Gran capacidad (en minería aluvial).



- Fabricación local.
- No necesita motor.
- Fácil operación.
- Buena recuperación de oro fino (en caso de un buen diseño y manejo).
- Alto grado de concentración.
- Recupera también oro sucio o parcialmente entrecido.
- Apto para limpiar colas de amalgamación.

### Desventajas:

- Necesita mucha mano de obra.
- Baja recuperación de sulfuros auríferos en minería primaria.
- Descarga del concentrado.

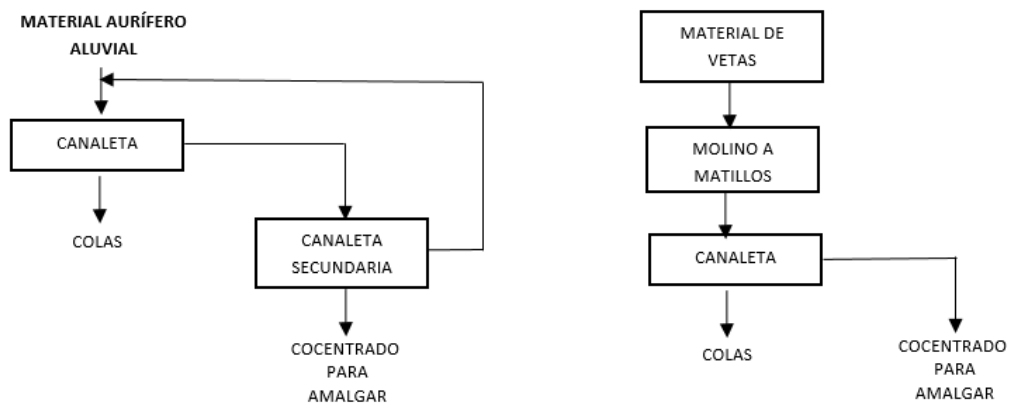


Figura 3. Diagrama de flujo considerando el uso de canaletas

Fuente: Antonio Salas C. y Octavio H. C. (2013). Avances tecnológicos en la concentración de minerales. Revista metalúrgica UTO

### **2.4.2.3 Jig (mecánico)**

La separación por medio de Jigs es uno de los métodos de concentración gravimétrica más antigua. El Jig es normalmente usado para concentrar material relativamente grueso y, si el material de alimentación es relativamente uniforme, entre 3 – 10 mm, no es difícil lograr una buena separación de minerales con un rango de pesos específicos estrecho en la alimentación (por ejemplo: fluorita, p.e. 3,2, del cuarzo, p.e. 2,7) y si la diferencia de pesos específicos es mayor la separación será mejor.

Muchos circuitos grandes de Jigs siguen trabajando en operaciones de tungsteno o wolfrán, carbón, casiterita, oro, baritina y hierro. Como ejemplo podemos mencionar el uso de jig tipo Panamerican en las dragas de Teoponte (South American Placers), los

jigs tipo Yuba en la draga de Estalsa en el cañadón Antequera. Actualmente estas dragas están paradas.

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 (stroke) 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 esta 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. El movimiento pulsante puede obtenerse usando un Jig de cedazo fijo, y pulsar el agua, o empleando un cedazo móvil, como en los Jigs manuales o maritales (Figura 4). El agua puede pulsarse de diferentes maneras, así en los Jigs tipo Yuba, usados en las dragas, el agua se mueve gracias a un mecanismo que trasmite un movimiento horizontal a un diafragma de goma, una situación similar se presenta en los Jigs tipo Pan-American, usadas también en dragas.

El largo del golpe en los Jigs tipo Pan-American puede ajustarse entre 6,35 mm y 38,10 mm. Para cada operación en particular el largo del golpe debe determinarse empíricamente. En general se puede indicar que para alimentación gruesa y pesada el golpe tiene que ser largo. La velocidad *Servicio Nacional de Geología* y de los golpes varía de 50 a 60 golpes por minuto en carbón y unos 380 golpes por minuto en oro.

Se ha visto que es apropiada una velocidad de 125 rpm para estaño.

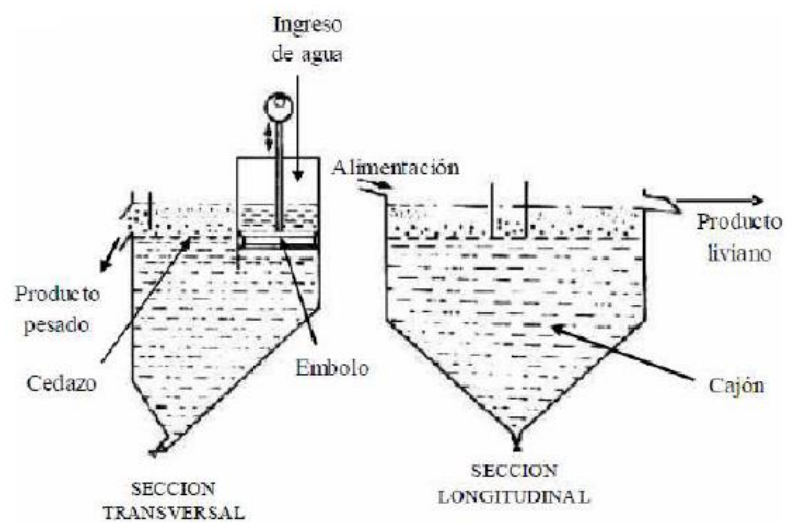


Figura 4. Esquema simplificado de un Jig.

Fuente: Armando Alvarez Q. (2006). Tecnología de la concentración centrífuga. Universidad mayor de San Andres (pp 11-100). Bolivia.

### **Ventajas:**

- Versátil.
- Fabricación local.
- Alta capacidad (apto para minería aluvial).
- Bajo costo.

- Buena recuperación de oro y minerales pesados acompañantes como sulfuros en la minería primaria, diamantes en la minería aluvial.
- Recupera también oro sucio o parcialmente entrecido.
- Buena recuperación de oro laminado.
- Descarga del producto en forma continua.

**Desventajas:**

- Requiere mano de obra experimentada para su operación.
- Requiere motor.
- Requiere agua limpia.

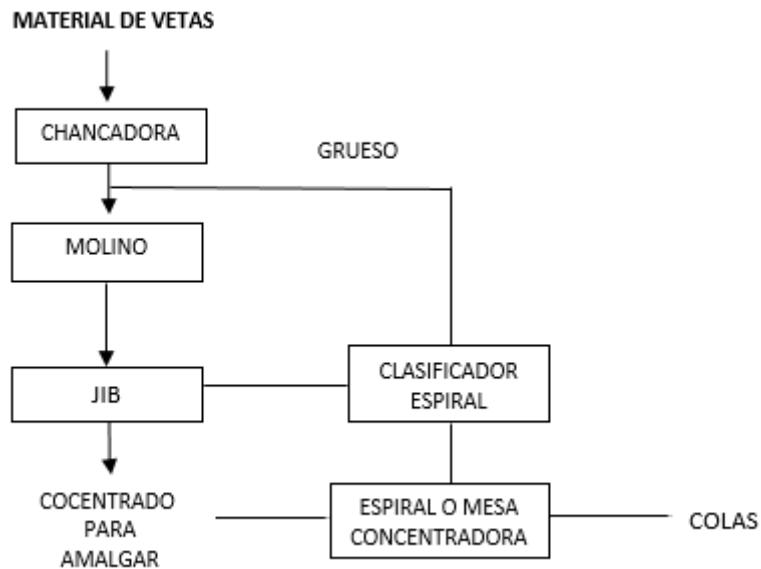


Figura 5. Diagrama de flujo considerando el uso de Jigs  
 Fuente: Armando Alvarez Q. (2006). Tecnología de la concentración centrífuga. Universidad Mayor de San Andrés (pp 78-100). Bolivia.

#### 2.4.2.4 Espirales de concentración

El concentrador de espiral consiste en una canaleta helicoidal con cuatro a siete vueltas. 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.

Las partículas más pesadas se reúnen en el fondo, donde la fricción y el lastre actúan para aminorar la velocidad del material. Debido a la forma de espiral del lecho de la canaleta, las fuerzas centrífugas en la pulpa llevan al material más liviano hacia afuera, hacia el borde de la espiral, mientras que el material pesado permanece adentro.

Los modelos modernos de un diseño relativamente simple de espirales (tal como un Reichert, ver Figura 6) han rebasado gradualmente los tipos antiguos de espirales más complicados (espirales tipo Humphrey o Reichert WW6) con alimentación de agua de lavado y cortadores de concentrado en diferentes puntos a lo largo de la espiral.

Al final de las espirales modernas, los cortadores dividen el producto en cuatro diferentes fracciones: concentrados, mixtos, colas y agua. Existen tipos específicos de espirales, utilizados para la limpieza



realizada en una etapa posterior sobre los concentrados enriquecidos o sobre las cargas con alto contenido de minerales pesados (las espirales de mediano grado y de alto grado tienen más salidas para los concentrados, pero muy raramente son utilizadas en el procesamiento de oro).

La forma helicoidal hace posible la combinación de varias espirales en una sola columna (duplex, triplex). La mayoría de las concentradoras espiral están hechas de plástico o de resina sintética, de fibra de vidrio reforzada, con cubierta de poliuretano.

Las espirales pueden ser utilizadas para una variación de tamaño de grano desde 2 mm hasta aprox. 30 mm. Por lo general, las espirales se caracterizan por su alta recuperación, pero también por su bajo factor de enriquecimiento, y es debido a este motivo que las espirales son utilizadas exitosamente en la fase de preconcentración o como "scavenger" (para la recuperación de minerales residuales de valor de las

colas). Las espirales no son apropiadas para el enriquecimiento de los concentrados obtenidos a través del lavado en canaletas. Sin embargo, no hay duda que las espirales pueden ser utilizadas efectivamente incluso como un reemplazo de las canaletas, combinadas con otro equipo para la concentración secundaria de pre-concentrados (mesas concentradoras, por ejemplo).

Descripciones detalladas sobre el manejo de espirales se encuentra en la literatura.

Las espirales permiten tener una producción continua de pre-concentrados, así como también extraer un producto intermedio (como sulfuros) y son extraordinariamente útiles para la extracción de lodo del material, debido que la mayor parte del agua, junto con las partículas ultrafinas, se extrae separadamente.

Las espirales no requieren de impulsión motriz, requieren poco mantenimiento, también son resistentes

al desgaste mecánico y cada unidad puede tratar hasta 2 t/h, requieren poco espacio y son fáciles de operar.

Al final de la espiral están las salidas de los productos (concentrado, mixtos, colas y agua). El agua generalmente contiene los lodos. Mediante los cortadores se puede definir el ancho de la ceja del concentrado y de los mixtos.

Según la posición de los cortadores, se pueden obtener los siguientes productos:

Tabla 2

Alternativas para la selección de diferentes productos en una concentradora espiral

<b>Concentrado</b>	<b>Mixtos</b>	<b>Colas</b>	<b>&lt;&gt;</b>
Alternativa a)	piritas y oro (alta ley en oro)	pirita-oro-cuarzo	cuarzo con algo de pirita entremezclada
Alternativa b)	piritas y oro (baja ley en oro)	piritas entremezcladas para remolienda	cuarzo

Fuente: (GP, s.f.), 2016. Concentradores de espiral. Recuperado de: <http://www.gama-peru.org>



Figura 6. Modelos de espirales

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Criterios de concentración. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 35 –107). Chile.

En comparación con las mesas vibratoras y con los concentradores centrífugos, las espirales son significativamente más económicas.

**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.
- Alta capacidad (hasta 50 t/d para una espiral simple).
- Precio moderado.

**Desventajas:**

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



Figura 7. Diagrama de flujo considerando el uso de espirales  
 Fuente: Cano C.M., (1991). Aplicación de espirales en la concentración de minerales. Universidad Mayor de San Andrés, la Paz- Bolivia.

#### 2.4.2.5 Concentrador centrífugo

Los concentradores centrífugos constituyen la principal innovación realizada a los implementos de concentración gravimétrica de oro. En un tiempo muy corto, han ganado gran aceptación para la recuperación gravimétrica de oro en minas grandes; frecuentemente en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar sobre molienda y antes de plantas de cianuración

o flotación para recuperar el oro grueso. También existen muchas aplicaciones en plantas industriales en la minería aurífera aluvial. Otra aplicación especial para los concentradores centrífugos es la recuperación del oro como un producto secundario, por ejemplo en canteras de grava. Todos los concentradores centrífugos operan con el mismo principio: básicamente, un recipiente que rota efectúa la separación gravitacional de la carga en un campo centrífugo.

Los tipos de concentradores centrífugos más utilizados están basados en el mismo principio, pero difieren en su diseño técnico. Se encuentran los concentradores knelson, knudsen y falcon y algunos de fabricación local (especialmente en Brasil).

Existen dos tipos principales de centrífugas:

- centrífugas sin inyección de agua en contracorriente (knudsen, algunos modelos de falcon).
- centrífugas con inyección de agua en contracorriente (knelon, algunos modelos de falcon).

La recuperación de oro libre puede ser buena bajo las siguientes condiciones:

- cuando la alimentación está clasificada en rangos de tamaño bien delimitados
- presencia de pocos minerales pesados acompañantes gruesos.

Las centrífugas ofrecen buena seguridad contra robos y ahorran fuerza de trabajo significativamente (lo cual puede ser una desventaja en la pequeña minería). Con las centrífugas se pueden lograr altos radios de enriquecimiento. Para la posibilidad de fundición directa, pero a menudo se necesita otro equipo más (p.ej. una mesa concentradora). En los circuitos de molienda, los concentradores centrífugos son utilizados efectivamente para recuperar el oro liberado.

Una desventaja de las centrífugas actuales es que este equipo por lo general no trabaja verdaderamente de



manera continua, es decir, la operación debe ser periódicamente interrumpida para descargar el concentrado retenido en el lecho del cono del concentrador. Esto implica una paralización en las actividades de aproximadamente 5 minutos y es posible solamente cuando la planta dispone de otra máquina de apoyo. De otra manera, esto causaría pérdidas significativas, debido a que el material tendría que ser desviado durante la descarga del concentrado o se tendría que utilizar otra centrifugadora como "stand-by".

Los intervalos de tiempo para la descarga deben ser determinados experimentalmente. Incrementar el tiempo de operación implica una elevación del factor de enriquecimiento en el concentrado, pero disminuye la recuperación total, porque las partículas de oro fino también se pierden progresivamente durante el lavado.

Recientemente han sido desarrollados los concentradores centrífugos de efusión semi-continua o continua (los nuevos equipos de falcon y knelson) pero,

hasta el momento, no se encuentran disponibles muchos datos sobre su rendimiento en la práctica.

### **Concentradores Knelson:**

En la década del 80 aparecieron una serie de equipamientos para el beneficio de minerales que utilizan la fuerza centrífuga para efectuar la separación de los minerales valiosos. El más conocido de ellos fue el concentrador Knelson, que en poco tiempo obtuvo gran aceptación en la industria minera. Debe señalarse que en el año 1998 había más de 2500 concentradores knelson operando en recuperación de oro en el mundo.

Algunas indicaciones generales respecto a los concentradores knelson serían las siguientes:

- Los concentradores se fabrican desde tamaños de laboratorio hasta unidades de alta producción y recupera partículas de oro de tamaños que van desde 6,35 mm hasta aproximadamente 1  $\mu$ m.

- En estos concentradores el problema de compactación del mineral que pudiese originar la fuerza centrífuga, fue solucionado introduciendo agua a presión en el sistema, contrabalanceando la fuerza centrífuga en el cono de concentración.
- Durante la operación de estos concentradores todas las partículas están sujetas a una fuerza equivalente

## **Características y operación del concentrador Knelson**

El concentrador centrífugo knelson (figura 8) consiste de un cono perforado con anillos internos y que gira a alta velocidad. La alimentación, que en general debe ser inferior a 6,35 mm es introducida como pulpa (20 -40 % sólidos en peso) por un conducto localizado en la parte central de la base del cono. Las partículas, al alcanzar la base del cono, son impulsadas para las paredes laterales por la acción de la fuerza centrífuga generada por la rotación del cono. Se forma un lecho de volumen constante en los anillos, los cuales retienen las partículas más pesadas, mientras que, las más livianas son expulsadas del lecho y arrastradas por arriba de los anillos para el área de descarga de relaves en la parte superior del cono.

El campo centrífugo en el concentrador varía con la altura del cono. Así, en los anillos inferiores, hay una tendencia a recuperar las partículas mayores del mineral

de mayor densidad, en cuanto a los anillos superiores, donde el radio del cono es mayor (es decir, mayor fuerza centrífuga), allí los minerales más finos aún pueden ser recuperados. La compactación del material del lecho se evita por la inyección de agua a través de los hoyos en los anillos. El agua es alimentada a partir de una camisa de agua fija externa al cono. Esta agua fluidiza el lecho de concentrado permitiendo que las partículas más densas, inclusive finas, penetren en el lecho bajo la acción de la fuerza centrífuga, varias veces superior a la fuerza de gravedad.

En la operación de los concentradores knelson, la eficiencia del proceso es posible si se evita la compactación del lecho de partículas de ganga dentro de los espacios inter-riffles, es decir, solamente si este lecho es mantenido dentro de un estado de fluidización apropiado. El procedimiento adecuado para la fluidización del lecho de partículas se puede realizar con un circuito hidráulico externo. El agua es inyectada dentro del cono a través de un ensamble de

perforaciones, de aproximadamente 800  $\mu\text{m}$  de diámetro, los cuales son practicados en forma tangencial en la pared del cono y a la misma altura dentro de cada espacio inter-riffles. Esta agua de contrapresión desarrolla una fuerza que una vez ajustada, permite contrarrestar la fuerza resultante, a la cual están sometidas las partículas del lecho dentro del cono que está girando, de ese modo se asegura la fluidización del lecho. El agua se inyecta en dirección opuesta a la rotación del cono, lo cual hace que las partículas continúen en movimiento y se concentren las partículas pesadas. En la Figura 8, se muestra un corte del cono del concentrador knelson con sus perforaciones. Los diferentes tipos de generaciones de conos que se han empleado en los concentradores knelson, se presentan en la Figura 9.

Al final de un periodo de operación del concentrador knelson, el concentrado que queda en los anillos es colectado y se retira por el fondo del cono. La duración del ciclo de concentración varía dependiendo

de la aplicación que se esté realizando. Típicamente los tiempos de duración de un ciclo de concentración serían los siguientes:

- Concentración de material aluvial: 8 a 24 horas.
- Concentración de minerales de oro de roca dura: 1 a 6 horas.

Los parámetros operacionales generalmente más manipulados en el concentrador knelson son el porcentaje de sólidos y la presión de agua de fluidización. La granulometría de la mena también es un factor importante a ser considerado; el límite es de 6 mm, no habiendo límite inferior especificado (de acuerdo con los fabricantes). La razón másica obviamente debe ser también tomada en cuenta.

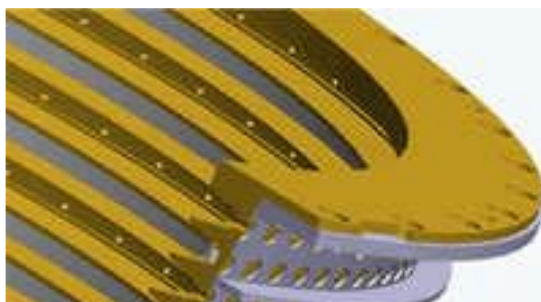


Figura 8. Corte del cono del concentrador Knelson  
Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Características del cono knelson.  
Apuntes de concentración de minerales II (pp. 49 –107). Chile

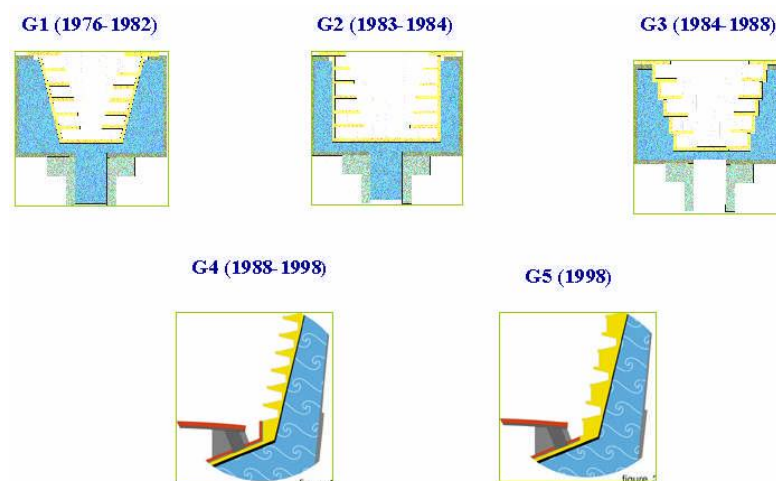


Figura 9. Tipos de generaciones de conos que han sido utilizados en los concentradores Knelson.  
Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Características del cono knelson.  
Apuntes de concentración de minerales II (pp. 50 –107). Chile

## Series de modelos de concentradores Knelson



Las series de modelos knelson que se ofrecen en el mercado, son las siguientes:

- Serie de descarga manual (MD).
- Serie de descarga central (CD).
- Serie de servicio pesado (XD).

#### **Los modelos de serie de descarga manual (MD).**

Son equipos de escala piloto y de laboratorio. Los modelos disponibles son:

- KC - MD 3 (50 kg/h; 1/6 HP).
- KC - MD 7,5 (1000 kg/h; ¾ HP).

El KC-MD 3 se ha convertido en el equipo estándar en los laboratorios, mientras que, el KC - MD 7,5 es un equipo empleado en estudios de investigación de minerales pesados, proyectos de tratamiento de desechos y como equipo para mejorar los concentrados de oro de baja ley.

#### **Los modelos de la serie de descarga central (CD).**

Éstas fueron las primeras unidades diseñadas para extraer el concentrado rápidamente, no en forma manual, y en un ambiente de completa seguridad. Los modelos que están disponibles son los siguientes:

- KC - CD 10 MS (2,27 t/h; 1,5 HP).
- KC - CD 12 MS (5,44 t/h; 2 HP).
- KC - CD 20 MS (22,68 t/h; 7,5 HP).
- KC - CD 30 MS (54,43 t/h; 15 HP).

Los modelos CD 10MS y CD 12MS son apropiados para los siguientes casos: concentración primaria, operaciones de bajo tonelaje, trabajos de pruebas a escala piloto, y reconcentración de concentrados primarios. Por otra parte, los modelos CD 20MS y CD 30MS son adecuados para usos de producción, generalmente en operaciones aluviales, pero puede usarse en operaciones de molienda de roca dura en donde hay limitaciones de presupuesto y un ambiente de baja corrosión.

Los requerimientos típicos de agua de fluidización en la serie CD utilizando los conos de concentración de la Generación -5 (G 5) son los siguientes:

CD10: 3,4 - 4,5 m<sup>3</sup>/h

CD12: 4,1 - 5,7 m<sup>3</sup>/h

CD20: 7,9 - 13,6 m<sup>3</sup>/h

CD30: 17,0 - 25,0 m<sup>3</sup>/h

Los tamaños máximos de alimentación son los siguientes:

Roca dura: mallas -10 (1,7 mm)

Placeres: 6,4 mm

**Los modelos de la serie de servicio pesado (XD)**

Estos modelos fueron incorporados en 1997. El concentrador knelson de la serie XD representa uno de los últimos avances en concentración centrífuga. Estos equipos han sido desarrollados para soportar las exigencias de las condiciones más difíciles de operación. La serie XD incorpora varias características nuevas de diseño ofreciendo mayor capacidad y mejor recuperación en un modelo fuerte y compacto. Los modelos disponibles son los siguientes:

KC - XD20 (22,68 t/h; 7,5 HP)

KC - XD30 (54,43 t/h; 15 HP)

KC - XD48 (136,08 t/h; 40 HP)

Los modelos XD son especialmente diseñados para cubrir la demanda en los ambientes de circuitos de molienda de roca dura. Sin embargo, son también apropiados para operaciones aluviales o para proyectos de retratamiento de relaves donde se presentan condiciones de acidez.

En las Figura 10, se presenta flow sheet de tratamiento de minerales aluviales empleando concentradores knelson.

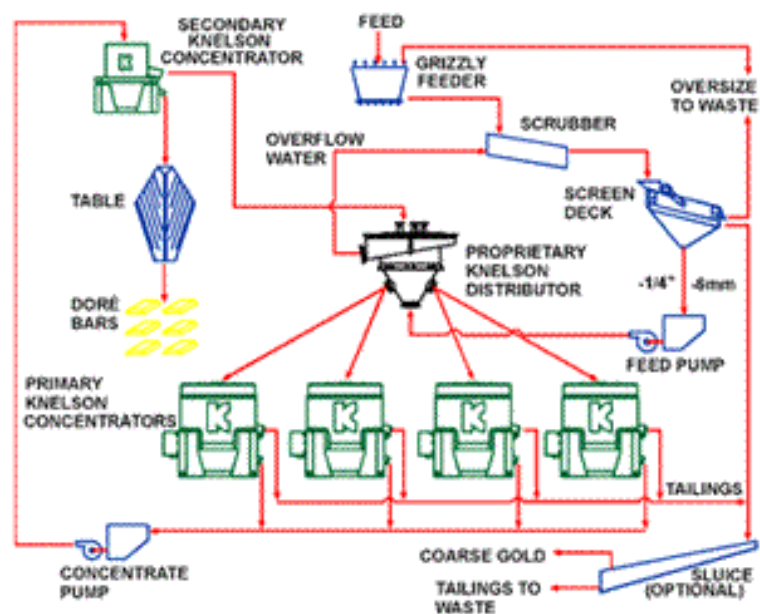


Figura 10. Flow sheet de tratamiento de oro aluvial empleando concentradores knelson  
Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Flow sheet de tratamiento de oro aluvial con knelson. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 52 –107). Chile

## Concentradores Falcon

El concentrador Falcon consiste de un bolo cilíndrico - cónico que gira a alta velocidad en el interior de una camisa fija cuya función es colectar el relave. La pulpa se alimenta en el fondo del cono, es acelerada y se va estratificando a medida que asciende en el rotor. Dependiendo del tipo de modelos de serie del concentrador que se trate (Serie SB o Serie C), las partículas serán sometidas a 200 G o 300 G, y el proceso de concentración en el bolo se realizará de acuerdo a un procedimiento diferente, en forma discontinua o continua.

El concentrador se utiliza en la separación de un gran número de materiales: minerales de hierro, sulfuros, carbón, tantalio, metales nativos como oro, plata, níquel, cobre, cinc, estaño, etc.



Figura 11. Concentrador Falcon  
Fuente: (FT, s.f.), Concentrador Falcon. Recuperado de  
<http://www.futuratech.pe>

### **Concentrador Falcon serie SB**

El concentrador Falcon serie SB se caracteriza por lo siguiente:

- Es un concentrador discontinuo.
- Utiliza agua de fluidización.
- Permite la recuperación de partículas muy finas, en algunos casos menores a 5 micrones.
- Con este equipo se obtienen concentrados de alta ley.

- Se logran recuperaciones en peso de concentrado de cerca del 1%.
- Permite la recuperación de partículas liberadas finas y ultra finas.

Las aplicaciones del concentrador Falcon modelo SB se pueden resumir en lo siguiente:

- Recuperación de oro libre, plata y platino.
- Tratamiento de flujos de descarga o alimentación a ciclones en circuitos de molienda.
- Limpieza de concentrados.
- Retratamiento de relaves.
- Tratamiento de materiales aluviales y placeres.

### **Funcionamiento del concentrador Falcon serie SB.**

Estos equipos operan en discontinuo y ocupan una zona de retención de lavado en la parte superior del rotor, requiriendo de la adición de agua de proceso.



Estas unidades pueden tratar partículas de hasta 6 mm, pero también son eficientes en la recuperación de tamaños finos. Las partículas que ingresan al equipo son sometidas a una fuerza de gravedad de hasta 200 G y son segregadas de acuerdo a su gravedad específica mientras se desplazan por la pared lisa del rotor. Las capas más pesadas pasan a la zona en que el concentrado queda retenido, que son las ranuras que presenta el equipo en la parte superior del rotor. La adición de agua a través de las ranuras presentes en la zona de concentrado permite que algunas partículas migren y sean retenidas solamente las más pesadas. Las partículas más livianas son eliminadas como relave por la parte superior del rotor. Cuando el concentrado ha llegado a alcanzar una ley adecuada, la alimentación se detiene por aproximadamente 30 segundos. El rotor disminuye su velocidad y mediante presión de agua se lava en concentrado, el cual se descarga por la parte baja del rotor y es conducido a una canaleta.

Tabla 3  
Especificaciones de modelos Falcon SB

<b>Modelo</b>	<b>Capacidad de tratamiento de sólidos (ton/h)</b>	<b>Motor (HP)</b>	<b>Agua de proceso (m<sup>3</sup>/h)</b>
SB 40	0 – 0,25	0,5	0,24 – 1,2
SB 250	1 – 8	3	1,8 – 2,7
SB 750	5 – 47	10	6 – 9
SB 1350	23 – 114	20	8 – 15
SB 2500	42 – 206	40	15 – 24
SB 5200	105 - 392	100	30 - 42

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Especificaciones de modelos Falcon SB. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 55 –107). Chile

### **Concentrador Falcon serie C**

El concentrador Falcon serie C (Figura 12) se caracteriza por lo siguiente:

- Funciona en continuo.
- No utiliza agua de fluidización.
- Este equipo es utilizado cuando se requieren altas recuperaciones (etapas “rougher” y “scavenger”).
- Se logran recuperaciones en peso de concentrado de cerca del 40 %.

- Es utilizado para maximizar la recuperación y disminuir la masa entrante a los procesos siguientes.
- Son adecuadas para preconcentrar o retratar flujos, ya que no se emplea agua adicional de proceso y los concentrados producidos son efectivamente deslamados y desaguados (en torno de 70 % de sólidos en peso).

Entre las aplicaciones del concentrador Falcón modelo C se pueden señalar las siguientes:

- Retratamiento de oro fino y sulfuros de relaves de flotación o cianuración.
- Preconcentración antes de la cianuración para aumentar el rendimiento.
- Retratamiento de relaves de tantalio y estaño fino.
- Remoción de cenizas y sulfuros en concentración de carbón.
- Retratamiento de hierro fino en relaves.

- Preconcentración de depósitos de relaves de oro y plata.
- Preconcentración y deslamado de depósitos de minerales pesados.
- Preconcentración previa a la flotación o cianuración mediante remoción de partículas livianas no deseadas.

### **Funcionamiento del concentrador Falcon serie C.**

Las partículas que ingresan al concentrador son sometidas a fuerzas de gravedad de 300 G y son segregadas de acuerdo a su gravedad específica mientras se desplazan por la pared lisa del rotor. Las capas más pesadas son recuperadas en forma continua controlando el flujo de descarga a través de toberas de abertura variable. El concentrador no necesita del uso de agua de proceso y además, no requiere de interrupción del flujo de alimentación ya que trabaja en forma continua. El concentrado producido estará

deslamado y parcialmente desaguado. El relave se elimina por la parte superior del rotor.

Tabla 4  
Especificaciones de modelos Falcon C

Modelo	Capacidad de tratamiento de sólidos (ton/h)	Motor (HP)
C 400	1 – 4,5	10
C 1000	5 – 27	20
C 2000	20 – 60	40
C 4000	45 - 100	100

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Especificaciones de modelos Falcon C. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 56 –107). Chile

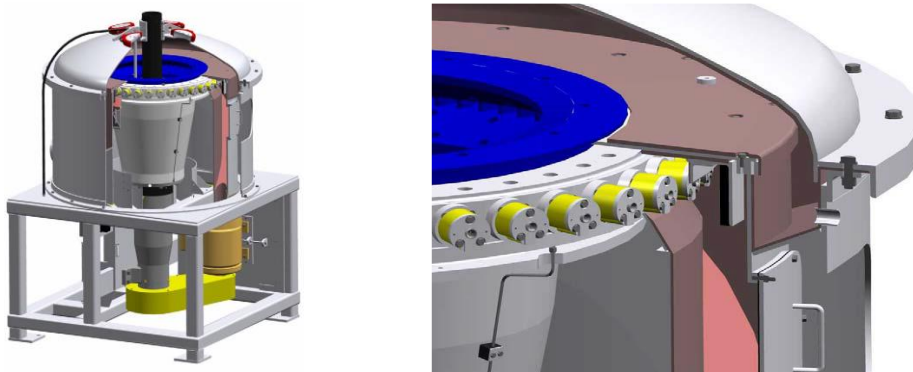


Figura 12. Concentrador Falcon serie C, mostrándose además el detalle de la descarga del equipo.

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Concentrador Falcon modelo C. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 57 –107). Chile

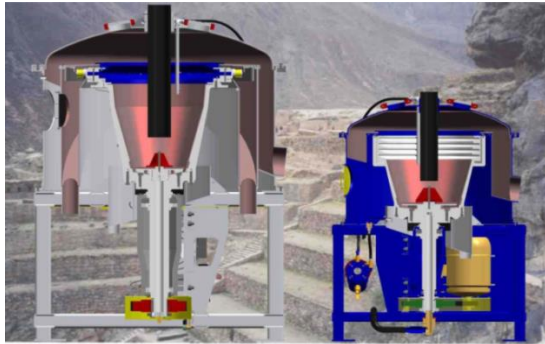


Figura 13. Comparación de los tamaños de los concentradores Falcon C 4000 y Falcon SB 2500

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Concentrador Falcon C y SB. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 58 –107). Chile

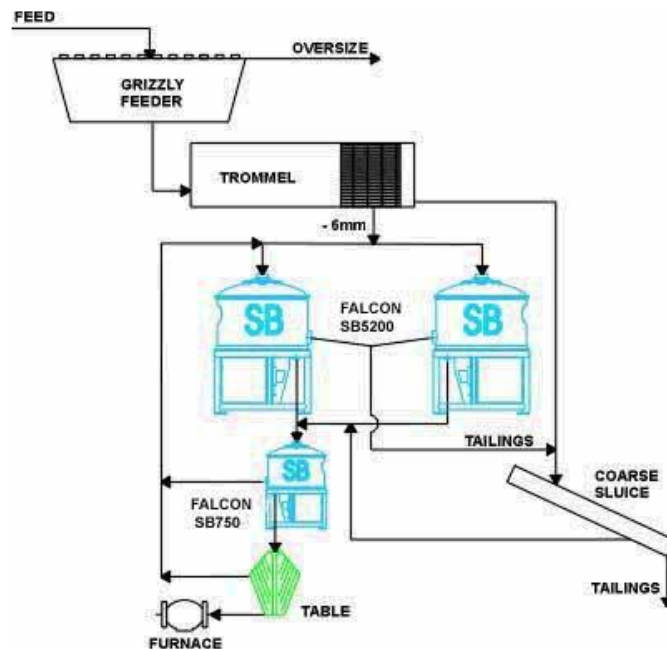


Figura 14. Diagrama de tratamiento de oro aluvial con concentradores Falcon serie SB

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Diagrama de tratamiento de oro aluvial con Falcon SB. Apuntes de concentración de minerales II (pp. 59 – 107). Chile

## **Concentradores iCON**

Desarrollado por el fabricante de los concentradores Falcon de Canadá, el concentrador iCON es un equipo sencillo, amigable con el medio ambiente, especialmente diseñado para la pequeña minería y minería artesanal. Ver Figura 15 y 16.

APLICACIONES: concentrador iCON puede emplearse:

- Minerales de roca, placeres aluviales consiguiendo recuperar muy bien el oro que se encuentre libre.
- Para el mineral de roca requiere que realice previamente la molienda para conseguir la liberación del oro.
- En el caso de los aluviales se requiere que se clasifique previamente a -2mm mediante una zaranda.
- El concentrador iCON es una familia de equipos que no contaminan debido a que no emplea insumos químicos para realizar la separación del Oro, sólo utiliza

gravedad y agua para el proceso de concentración del mineral.

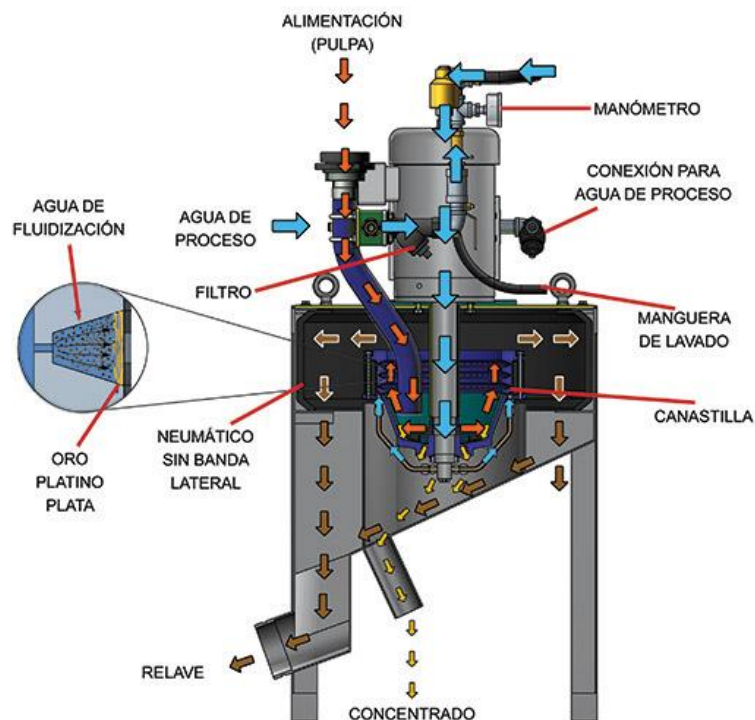


Figura 15. Concentradores iCON

Fuente: icon gold recovery (2017), Concentrador iCON. Recuperado el 30 de mayo del 2017, de <http://www.iconcentrator.com>



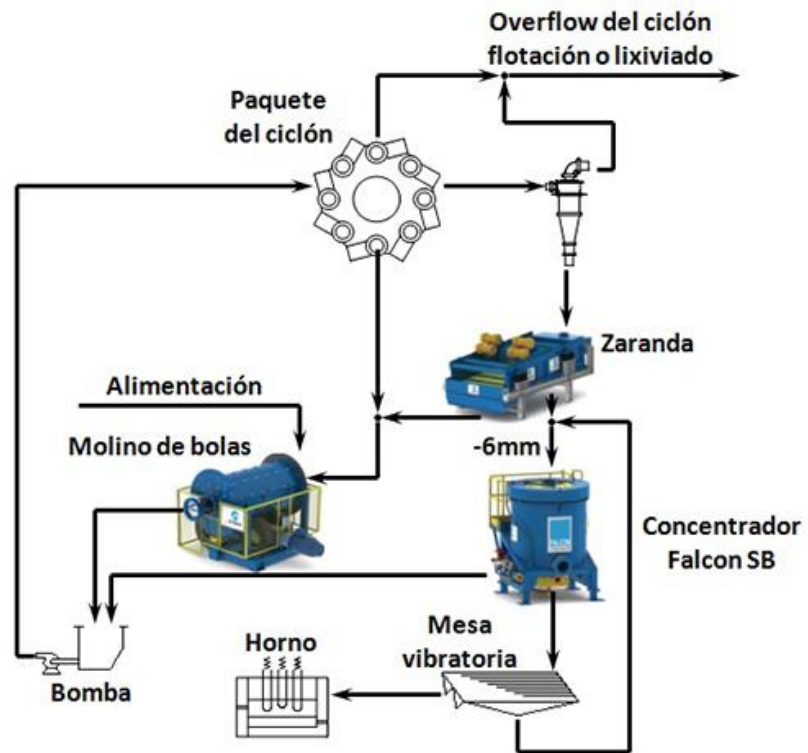


Figura 16. Diagrama de tratamiento de oro aluvial con concentradores iCON  
 Fuente: icon gold recovery (2017), Concentrador icon. Recuperado de <http://www.iconcentrator.com>

## **CAPITULO III**

### **PROCESO EXTRACCION DE ORO ALUVIAL MINERA LIMATA**

#### **3.1 UBICACIÓN**

COOPERATIVA MINERA LIMATA LIMITADA con nombre comercial, cuya dirección legal es Av. Arenales Nro. Sn Barrio Central (a Una Cdra. Del Parque Industrial Ananea) en Puno / San Antonio de Putina / Ananea, como se puede ver en el mapa (Figura 17).

COOPERATIVA MINERA LIMATA LIMITADA se encuentra dentro del sector EXP. OTRAS MINAS Y CANTERAS NIA. Registrada dentro de las sociedades mercantiles y comerciales como una COOPERATIVAS, SAIS, CAPS localizada en Puno / San Antonio de Putina / Ananea.

La zona de estudio está ubicada en la parte norte del departamento de Puno y dentro de las coordenadas geográficas siguientes:

\* Latitud: 13° 15' 00" S a 15°00'12" S

\* Longitud: 69° 22' 15" O a 69°44'40" O



Figura 17. Diagrama ubicación de la Mina Limata

Fuente: google (s.f.) 2017. Ubicación de la mina limata ananea. Recuperado el 31 de mayo del 2017 de <https://www.google.com.pe/maps/place/Puno>

## 3.2 GEOLOGÍA REGIONAL.

### 3.2.1 Marco Geológico Regional.

Regionalmente las estructuras más sobresalientes corresponden a rocas pelíticas - pizarrosas más antiguas constituidas por Pizarras y Cuarcitas de coloraciones gris blanquecinas, del paleozoico inferior (formación sandia),

suprayaciendo a esta y en contacto fallado inversamente, se encuentran areniscas cuarzosas muy subordinadas y pizarras de textura criptocristalina con coloraciones gris azuladas (formación Ananea) marcadas por un metamorfismo epizonal, en general forman aureolas de contacto con cuerpos intrusivos pérmico - triásicos. Laubacher, G. (1978).

Más al sur se encuentran suprayaciendo en continuidad, afloramientos del Paleozoico Superior, caracterizados por una secuencia clástica, samítica – pelítica de areniscas cuarzosas con coloraciones Gris Rosáceas e intercalaciones de limoarcillitas de origen continental (Grupo Ambo). A su vez y en concordancia, se encuentran expuestas secuencias pelíticas-samíticas - calcáreas, con coloraciones verde- grisáceas de morfología suave y abrupta (Grupo Tarma) G., Newell, N.(1946). Ya al oeste y al sur se presentan algunos afloramientos escarpados de secuencias calcáreo - pelíticas de superficie Kárstica. Esta dada por calizas con coloraciones gris a gris oscuras. calizas silicificadas y dolomitizadas, limoarcillitas calcáreas de color gris correspondientes al grupo Copacabana del pérmico inferior. Dumbar, G. Newell, N. (1946).

El paleozoico superior está caracterizado por una secuencia sedimentaria- vulcánoclastica continental que ha dado lugar a morfologías muy abruptas y originando dos litofacies una conglomerádica a brecha sedimentaria y otra volcánica de carácter Ígneo Efusivo de coloraciones rojizas, violáceas que tipifican las capas rojas correspondiente al grupo Mitu. Laughlin, D. (1924).

El Mesozoico está representado por secuencias continentales y marinas cuyos afloramientos se caracterizan mayormente por areniscas de grano medio a fino de coloración blanquecina con algunos niveles rosáceos en capas rojas bien estratificados además de la presencia de calizas bituminosas de coloración gris blanquecinas del grupo moho.

Durante el mioceno y plioceno se presentaron eventos volcánicos efusivos de carácter ácido correspondiente a la formación quenamari y relacionados a la formación picotani, de periodos relativamente cortos.

Mientras que en el plioceno - pleistoceno se formaron depósitos poco consolidados polimícticos sub angulosos a sub redondeados mal clasificados con presencia de matriz limosa, y caracterizados por lodolitas y areniscas gruesas de rasgos heterogéneos denominado como formación Arcoaja. Además de depósitos fluvioglaciares que ocupan en gran parte la depresión longitudinal de Ananea - Crucero.

### **3.2.2 Geología local.**

Localmente el área de influencia comprende las siguientes unidades litoestratigráficas.

**Formación Ananea (SD-a).**- Esta unidad corresponde al basamento paleozoico, está caracterizada por la presencia de pizarras y filitas producto de una esquistosidad de flujo son de coloración negra con presencia de  $Fe_2O_3$  y cuarcitas de coloración gris Blanquecina caracterizada por una abundante sedimentación con presencia de sílice. La estructura más sobresaliente es el cerro chosicanipata cuya superficie expuesta que se encuentra escarpada y emplazada en el distrito de

Ananea. Esta formación constituye el límite de mineralización glaciofluvial.

**Grupo Tarma. (P-ta).**- Se encuentra en la parte sur este del yacimiento San Antonio de Poto, en el sector del cerro Santa Rosa, emplazándose por el margen izquierdo de la carretera Ananea Trapiche, específicamente aflora en el cerro quebrada estructuralmente está caracterizada por la presencia fallas normales y de rumbo; no se ha evidenciado presencia de algún tipo de mineralización en sus en sus afloramientos.

**Formación Arco-Aja. (Q- aj).**- Constituida por un miembro inferior de sedimentos palustres finos y un miembro superior aluvial y conglomerádico. Localmente se encuentra suprayaciendo a la formación Ananea bajo una discordancia angular cuaternaria.

Esta formación en gran mayoría se encuentra emplazada en la parte este de la cuenca Ananea Ancocala comprendida entre el macizo de Ananea 5800 m.s.n.m. y una superficie levemente plana producto de la abrasión glaciár.

### **a) Control estructural.**

El principal tren de estructural es la presencia de la cordillera oriental (Carabaya), su superficie está controlada por una morfología abrupta y variada (levantamientos, hundimientos, plegamientos y fallamientos). Que dieron como resultado su relieve actual el cual forma una divisoria entre la cuenca altiplánica y la llanura amazónica. Además de la presencia de una gran provincia metalogenética (yacimientos primarios orogénicos emplazados en filones, vetas y mantos) y yacimientos de origen secundario (placeres auríferos).

### **b) Control lito estratigráfico.**



- Las fuentes primarias de oro detrítico son mineralizaciones pre carboníferas emplazadas en pizarras, esquistos y cuarcitas del paleozoico inferior.
- Solo el material glacial y derivado antiguo y /o reciente presentan contenidos auríferos.
- De acuerdo al volumen y potencia de los estratos se puede determinar mejor las leyes de oro.
- Localmente el área de mayor interés es el riachuelo Ananea, cuyo cause representa interés económico debido al transporte de material con contenido aurífero hacia las partes más bajas y profundas.

#### **d) Yacimiento mineral.**

Los Depósitos morrénicos con contenido aurífero son de origen glaciofluvial y se emplazan íntegramente en la formación arco aja cuyos materiales se componen de clastos dispersos que son de distinto tamaño en una matriz limo – arcillosa - arenosa. Estos depósitos presentan variaciones en la composición litológica de sus clastos, dependiendo de su lugar de origen; Los depósitos morrénicos tienen

importancia económica debido a su contenido aurífero ya sea en forma de charpas (3 mm - 1,5 mm) o de grano fino (< 1 mm).

Además se han determinado tres horizontes de deposición aurífera:

- 1.- Un conjunto de clastos de coloración gris con matriz arcillosa de característica sub angulosos con contenidos auríferos de hasta 0,14 g Au/m<sup>3</sup>.
- 2.- Supra yaciendo a los sedimentos anteriores se encuentra un horizonte de sedimentos gris amarillento con tenores de 0,50 g Au/m<sup>3</sup> como valores máximos, cuya potencia es variable de acuerdo a la dirección de flujo.
- 3.- Finalmente como límite superior se encuentra un aglomerado de sedimentos sub redondeados intercalados con drumlins (barro glacial) cuya potencia varía entre 2 m hasta 11 m de altura y su contenido de oro es < 0,1 g Au/m<sup>3</sup>.

### **3.3 PLANEAMIENTO DE MINADO**

#### **3.3.1 Factores a considerar del plan de minado**

Los elementos considerados en el plan de minado para explotación de gravas auríferas son los siguientes:

- Tipo de mineralización del yacimiento de origen glaciar y fluvio-glaciar con contenido de leyes favorables.
- No existirá desbroce de cobertura vegetal para la extracción de la grava aurífera.
- Existen las posibilidades y alternativas de vías de acceso, para el transporte en volquetes, por trochas de acceso a los tajos o canteras, botaderos y planta lavado.
- Los costos de producción se calculan, teniendo en cuenta los rendimientos de los equipos actuales y otros por servicios de adquisición, con visión de estandarización en el futuro.

#### **3.3.2 Descripción del proceso actual**

Las labores de operación de la cooperativa Limata, con proceso de extracción de morrenas auríferas aplicando el

método de explotación a cielo abierto mediante el sistema de canteras; utilizando equipos de movimiento de tierras como cargador frontal, excavadoras y volquetes de 15 metros cúbicos de capacidad con de diseño de bancos de 8 a 12 metros de altura, para evitar corrimientos y de desmoronamiento por efectos de las lluvias y filtraciones de agua.

Las alturas de los bancos varían hasta 12 metros y los ángulos de talud de 45 a 60 grados.

Se emplean métodos de explotación semi mecanizada, la remoción del material se realiza mediante las excavadoras y la voladura se realiza muy excepcionalmente. En este método se utiliza monitores hidráulicos para el lavado y arrastre del material aurífero mediante un plano inclinado que son las plantas de lavado gravimétricos denominados los chutes donde el material fino (arena negra) con oro se depositan en los canales de riflerías y continuado con canales con tendido de alfombras para atrapar el oro más fino para mejorar la recuperación (concentración gravimétrica artesanal). El material grueso denominado desmonte (relave) es trasladado a las canchas deposición

utilizando equipos de carguío y acarreo para ello cada chute, cuentan con cargadores frontales y volquetes.

### **3.4 DISEÑO Y CARACTERÍSTICAS DE LOS BANCOS**

#### **3.4.1. Configuración geométrica de los bancos**

Para determinar las características geométricas de los bancos, que ha resultado de ensayos de mecánica de suelos, in situ.

Dónde:

H: Altura de banco : 12 m como máximo

R: Ancho de la Rampa : 12 m mínimo

W: Ancho de berma : 6, 5 m

Gradiente de rampa : 0 a 8 %

Ángulo del talud de trabajo : 55 °

Angulo del talud final : 70 °

Las distancias entre la mina y planta son:

➤ Distancia máxima : 2400 m

- Distancia mínima : 800 m
- Distancia media : 1200 m
- Factor de esponjamiento : 30 %

### 3.4.2 Métodos Artesanales

**Chacras de oro.-** La operación consiste en empedrar adecuadamente las playas y meandros, los que son cubiertos por las crecientes de los ríos durante el verano y las partículas de minerales pesados (Au) son atrapados en los intersticios del empedrado.

**Cochazos.-** Este método consiste en el aprovechamiento del poder erosivo de las corrientes de agua. La operación consiste en la captación de las aguas de los ríos más cercanos y de las quebradas por donde discurren las aguas provenientes de las lluvias, las que luego de ser canalizadas son represadas en cochas, situadas en las partes altas y próximos del barranco.

El volumen de agua contenido se descarga para derribar el material aurífero y desplazarlo a lo largo de canales o caños empedrados en cuyo fondo queda retenido el oro.

La operación consiste en levantar el empedrado de los canales y tratar el material pasándolo por otro canal, para obtener las arenillas con contenido de oro, ya sea en láminas, charpas, posteriormente se efectuara el bateado para obtener el oro al estado libre.

### **3.4.3. Método Monitoreo – Disgregación Hidráulica**

En este método el arranque del mineral se hace mediante chorros de agua, conducidos por cañerías hacia los monitores bajo alta presión desde 15 a 180 m, de columna de agua.

Bajo la acción del chorro de agua se desintegra el material aurífero y son transportados a lo largo de canales metálicos o ríflera y/o canales empedrados donde el material aurífero es sometido a proceso de lavado y concentrado y en cuyo fondo queda retenido el oro entre rífler o intersticios del empedrado. Pudiéndose emplear en este método monitores hidráulicos.

#### **3.4.4 Método de Minado en Seco**

El método de minado en seco consiste en corte y relleno a cielo abierto, que se caracteriza por una intensa utilización de equipo mecanizado; como excavadores, cargadores frontales, volquetes, rastrillos, fajas transportadoras, etc. Los que son empleados en las operaciones de desbroce, arranque, carguío y acarreo de material aurífero a las plantas de tratamiento.

Este método se utiliza mayormente en los depósitos de tipos de terrazas medias altas de cerros y aventaderos no consolidados, para su operación se requiere de una planta de lavado estacionario y/o portátil, basados íntegramente en principios gravimétricos.



Este sistema tiene la facilidad de explorar, muestrear y explotar selectivamente con una alta recuperación por estar el depósito en seco; pero se tiene la desventaja que los costos unitarios de operación son altos.

#### **3.4.5 Topografía del Terreno**

El yacimiento es un depósito fluvioglacial principalmente de topografía uniforme, geológicamente clasificado como una planicie o terraza aluvial, donde se puede apreciar que la curva de nivel más alta es de 4570 m.s.n.m., y la curva de nivel más baja es de 4550 m.s.n.m.

#### **3.4.6 Selección del método de explotación**

La selección del método de explotación se define entre el método de minado en seco a cielo abierto (open-pit), con planta de lavado en shuts.

#### **3.4.7 Operación o explotación**

Para la etapa de operación en el área concesionada, se consideran las actividades que se mencionan en la Tabla 5.

Tabla 5  
Actividades de la etapa de operación

ETAPA III	OPERACION	MINADO:
		Descapoteo Desbroce Operaciones unitarias <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Arranque y carguío con excavadora</li> <li>➤ Transporte en volquetes</li> <li>➤ Pre-concentrado y concentrado</li> <li>➤ Recuperación</li> <li>➤ Tratamiento de efluentes mineros</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.8 Diseño del tajo abierto o a cielo abierto

En el área a minar habrá un frente de minado para la Unidad Operativa, en el cual la excavadora se colocará en la superficie del terreno y podrá excavar los 10 metros (promedio) de profundidad considerando bancos de 8 a 12 metros, con un avance de 300 m<sup>3</sup> promedio día por unidad operativa con un total de 3000 m<sup>3</sup> día con un margen de error del 10 % de producción.

Los volquetes se colocarán al nivel para poder ser abastecidos con el material con contenido aurífero.

### 3.4.9 Diseño de minado

Con respecto a la explotación minera, se opta por el método de explotación por banqueo descendente, abriendo primero los más altos y continuando la progresión hacia abajo (Figuras 18).

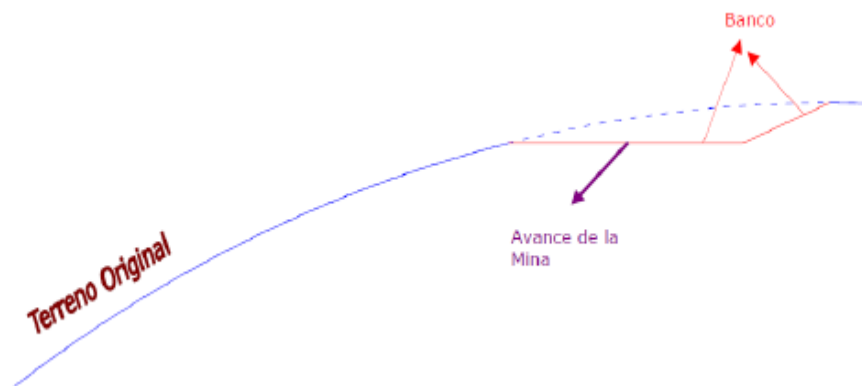


Figura 18. Diseño de minado  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.10 Descapeo

Consiste en la remoción del material superficial, que es la cobertura vegetal o materia orgánica, recubierto por el banco de material (material aluvial con contenido aurífero) en un espesor de 0,10 m a 0,80 m. Este material al inicio del tajo se acumula en un lugar apropiado, temporalmente cercano al tajo donde no interrumpirá el desempeño de las actividades propias de la mina, ni del drenaje de las aguas superficiales (fuera de los drenajes naturales); posteriormente según el avance de los tajos se irá acumulando la materia orgánica de retroceso en un espesor de 0,20 m, dejando apto el terreno para las actividades agrícolas (cubriendo así el área trabajada).

Este trabajo será realizado con maquinaria pesada, ya sea con el empleo de un tractor de orugas frontal o un cargador frontal.

#### **3.4.11 Desbroce**

Como el mineral no metálico económico se encuentra debajo del material orgánico el desbroce será insignificante (material estéril), este será acumulado temporalmente cerca del tajo en un lugar donde no interrumpa las labores ni el drenaje de las aguas superficiales, luego se irá acumulando en las zonas baja topográficamente del tajeo en retirada y sobre este se colocará la materia orgánica extraída inicialmente, restaurando así el entorno y quedando los suelos aptos para la agricultura. En las diferentes etapas no se usarán explosivos.

#### **3.4.12 Operaciones unitarias**

En el desarrollo de las labores mineras se identifican las siguientes operaciones:



Figura 19. Ciclo de operación de mina Limata  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.13 Arranque y carguío con excavadora

Operación que consiste en el arranque de los materiales (mineral aluvial aurífero) de acuerdo al diseño de extracción, a partir de las mejores condiciones geométricas y considerando las reservas de mineral aluvial existentes, es decir comenzando por la zona corte de cara libre o desde el bed-rock, la maquina extrae y

carga simultáneamente la forma del banco de explotación acompaña la geología del yacimiento. La altura del banco de explotación será de 8 a 12 metros.

Para este tipo de trabajos severos en excavación, se cuenta con las excavadoras CAT 325 DL, teniendo un alto grado de rendimiento y eficiencia en el sistema de excavación y carguío. Son equipos hidrostáticos y sus longitudes de pluma 513,08 mm, con un brazo de 269,24 mm.

Máquina autopropulsada, sobre zapatas metálicas, con una superestructura capaz de girar a 360 ° y que excava o carga, eleva, gira y descarga materiales por la acción de una cuchara fijada a un conjunto de pluma y balancín o brazo, sin que el chasis o la estructura portante se desplace. Con la remoción y traslado de los pasivos ambientales acumulados se obtendrá una superficie relativamente horizontal, a partir de la cual se iniciará el primer banco.

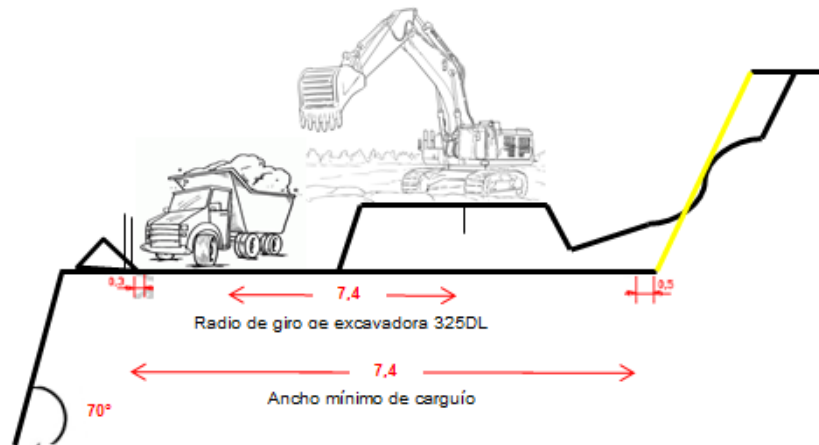


Figura 20. Arranque y carguío con excavadora  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.14 Transporte de material mineralizado

El transporte se realizó con el empleo de volquetes, cuyo recorrido aproximado será de 1200 m. de la zona de minado a la tolva de acumulación para su respectivo tratamiento, el traslado se realiza sin ninguna clasificación.

La capacidad de la tolva de los volquetes debe ser de 15 m<sup>3</sup>, pero por la densidad del material que es de 2,0 a 2,3 y su esponjamiento entre 25 a 30 %, se considerará 8,5 m<sup>3</sup> la capacidad de la tolva del volquete para todo cálculo. Se utilizará dos volquetes para cada chute.



El número de volquetes para el transporte son de 04 unidades y 01 de trabajo en cancha para el transporte de gruesos por unidad operativa.

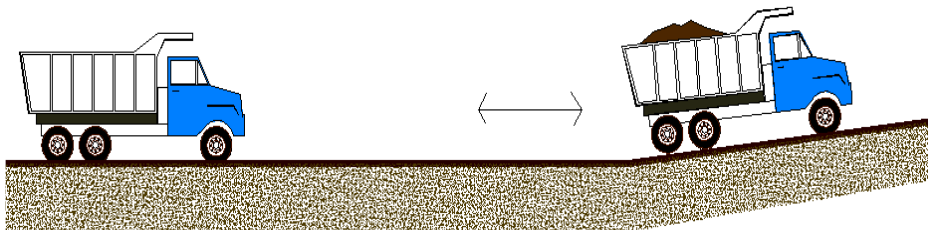


Figura 21. Transporte de material mineralizado  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.15 Transporte de material lavado

Para retirar el material lavado en el chute se empleará cargador frontal y los mismos camiones volquetes, estos relaves gruesos y medios serán conducidos a la cancha de relaves o depósitos de gravas lavadas, donde a medida que avanza la explotación, la disposición se hará en forma de abanico, con mayor área de almacenamiento hacia el exterior, en caso que se encuentre áreas de trabajo anterior, se irá relleno estos de manera que se adelante el cierre de mina en forma progresiva.

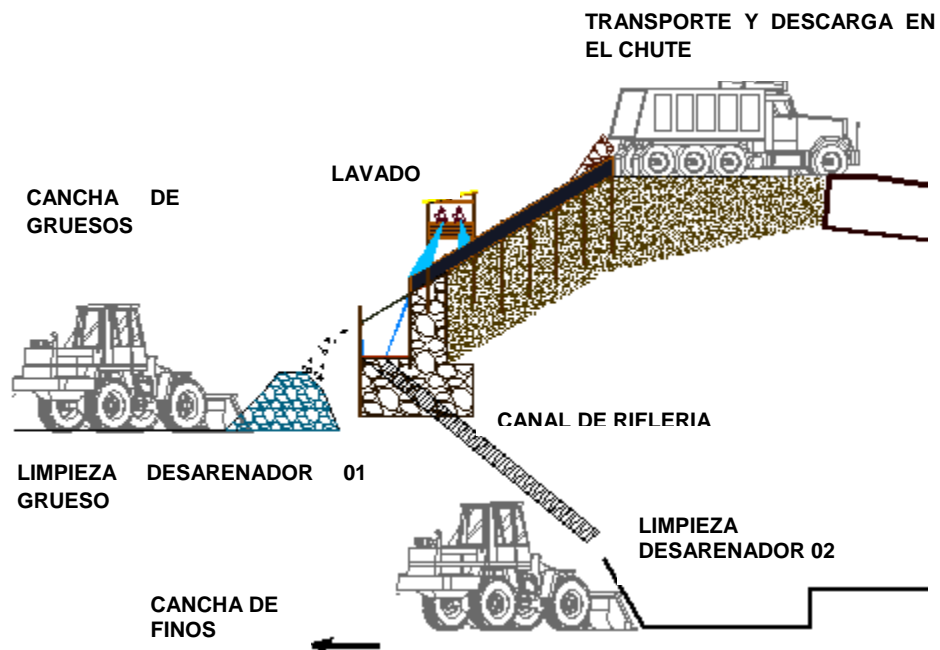


Figura 22. Transporte de material morrenico lavado  
 Fuente: elaboración propia

### 3.4.16 Proceso de amalgamación

El concentrado final obtenido en bateas metálicas de tipo cono se somete al proceso de amalgamación; previo lavado con soda cáustica y/o detergente; para luego ser alimentados por lotes a una batea que hace las veces de un amalgamador intermitente, mediante acción de frotamiento y combinación dando origen a la amalgama (mercurio y oro), el proceso dura

un promedio de 30 minutos, luego se procede al prensado manual con lona, quedando la amalgama (oro crudo).

La relación de oro y mercurio en el proceso de amalgamación es 1:1 según datos obtenidos en la práctica esta puede variar según las técnicas del proceso; al inicio del proceso de amalgamación con la relación indicada del uso de mercurio se requerirá 340 g de Hg metálico por día aproximadamente por unidad operativa.



Figura 23. Amalgamación

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.17 Refogado

El procedimiento será: el oro crudo producto de la operación de amalgamación intermitente se colocara en crisol metálico de la retorta, calentándolo externamente con un soplete a gas, el mercurio se evapora por el incremento de la temperatura mayor a 308 K llegando al punto crítico se condensa por la acción de refrigeración con agua fría dentro de la cámara; obteniéndose así el mercurio residual destilado en un recipiente con agua. El mercurio recuperado se vuelve a reutilizar en el sub siguiente proceso de amalgamación; la recuperación es de 97 % de mercurio; quedando dentro del crisol el oro esponja para su pesado y su posterior comercialización; de esta forma la reposición del mercurio para los siguientes procesos será mínimo el 3 % de pérdida (residuos de mercurio que quedan en las paredes interiores del equipo y otros)

### **3.5 COMPONENTES DEL TRATAMIENTO METALÚRGICO**

### **3.5.1 Chute**

El Chute es una tolva que tiene la finalidad de almacenar el mineral de grava aurífera, una capacidad de 10 m<sup>3</sup> en donde se realizara el lavado del mineral, con el objetivo de separar la mena y la ganga a través de chorros de agua a presión que serán bombeadas utilizando motobomba centrífuga de 101,6 mm x 101,6 mm, al final de la tolva estará instalada una parrilla de 12,7 mm, para la separación de gruesos y finos. Los gruesos serán mayores a 12,7 mm y los finos menores a 12,7 mm, los cuales ingresaran a las canaletas que contarán con riflerias y alfombras para la recuperación del concentrado.

### **3.5.2 Parrilla o clasificador grizzly**

Por la variedad de material tratado, en la minería aluvial hay que eliminar rocas estériles gruesas antes de la alimentación a las canaletas para posteriormente ser concentrados.

### **3.5.3 Canaletas o sluices**

Las canaletas son muy usadas en la minería aurífera, principalmente en las operaciones pequeñas de minería aurífera aluvial y en la concentración de mineral primario molido. No hay duda de que en la pequeña minería aurífera las canaletas son el equipo más importante para la concentración gravimétrica.

Existen miles de minas en todo el mundo que exclusivamente trabajan con canaletas y bateas. Calculando la capacidad instalada, la canaleta es una de las estructuras más utilizadas para el tratamiento de material aurífero. Generalmente consisten de un canal, a través del cual fluye la pulpa, estos canales cuentan con trampas para la captura de minerales pesados, los cuales por diferencia de pesos específicos se hunden los más pesados hasta el fondo y los menos pesados quedan en la superficie. Existen muchas formas y tipos de canaletas, tanto para trabajar oro primario (de vetas) como oro aluvial disperso en material morrenico.

#### **3.5.4 Canaletas con rifles**

Los canaletas tienen la finalidad de sostener las riflerías, como también sirve como conducto de la pulpa en donde se obtiene el pre concentrado, las dimensiones de las canaletas son de 7 m x 0,70 m x 0,25 m, en la instalación de la empresa se tiene cuatro canaletas, las riflerías, son estructuras hechas de platinas de fierro de 3,175 mm de espesor, separación de 45 mm entre pestaña y pestaña con un ángulo de inclinación de pestaña de 65 ° promedio, las dimensiones son de 0,35 m x 0,70 m.

### **3.5.5 Canalones con alfombras**

Luego de las canaletas de riflería, el material pasa a la etapa de concentración secundaria canalones con alfombras de 1 metro de largo donde debe quedar atrapado gran parte del oro fino. Estos canalones son de 3 metros de largo, se tiene 6 canalones.

### **3.5.6 Desarenador**

El desarenador, es una estructura diseñada para retener relave intermedio ( $<12,7 \text{ mm} - 0,083 \text{ mm}$ ), arena principalmente, que son arrastrados por el flujo turbulento de la pulpa (material – agua); para evitar que ingresen, al canal de aducción y a la primera poza de sedimentación, pudiendo disminuir la capacidad hidráulica y causar problemas de colmatación durante el proceso de tratamiento.

La pulpa que no llega a depositarse sobre las trampas y alfombras, es conducida hacia una poza de desarenado, donde las arenas se precipitan.

Esta estructura, permite realizar la limpieza de la arena que proviene de la etapa de concentración gravimétrica, utilizando maquinaria pesada como es el cargador frontal y volquete; la misma que debe ser trasladado y depositado dentro de relave grueso para evitar que sean arrastrados por la escorrentía. La cantidad de este material es aproximadamente el 35 %.

### **3.6 Poza de lodos**



Tratamiento secundario, su funcionamiento se basa en la reducción de la velocidad del agua y de las turbulencias, permitiendo así que el material sólido transportado en suspensión se deposite en el fondo, de donde es retirado periódicamente (limpieza) utilizando bomba de lodo.

La sedimentación consiste en la separación sólido líquido, por acción de la gravedad, en donde las partículas suspendidas tienen mayor peso específico que el agua. Las partículas en suspensión provenientes del lavado de la grava aurífera, serán tratados en el circuito de pozas de tratamiento, estas pozas estarán ubicadas dentro del área del proyecto.

Se construirán dos pozas para la sedimentación de lodos correspondiente (tratamiento de aguas con sólidos en suspensión), las dimensiones variaran entre 50 m - 60 m de ancho por 70 m - 80 m de largo con una profundidad de 5 m; de tal manera que se tendrá pozas de distintas dimensiones con capacidades distintas de volumen.

### **3.6.1 Pozas de sedimentación**

Las pozas de sedimentación son estructuras de recepción de efluentes líquidos que son arrastrados provenientes de las pozas de lodos, con un canal comunicador o tubo adecuado, esta etapa contempla la construcción de dos pozas.

### **3.6.2 Poza de clarificación - recirculación**

La poza de clarificación es una estructura de recepción de efluentes líquidos provenientes de las pozas de sedimentación, el mecanismo de recepción es por rebalse, de tal manera se reciba el líquido con una mínima cantidad de sólidos en suspensión, de tal manera que se pueda utilizar para bombear para el lavado de material aurífero aluvial en el chute, ocasionando un sistema de recirculación del agua.

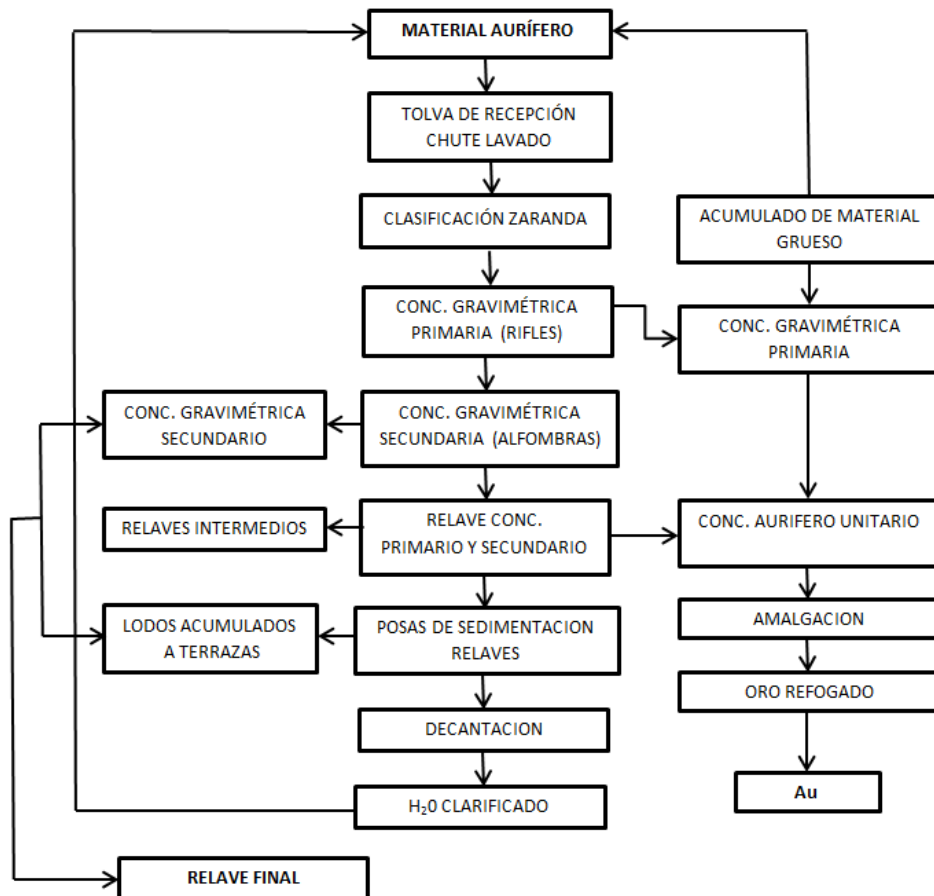


Figura 24. Flow sheet lineal del tratamiento de material aurífero aluvial

Fuente: Cooperativa Minera Limata. Puno

## **CAPITULO IV**

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

#### **4.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES**

Para el desarrollo de las pruebas del presente trabajo de tesis, se consideró el mineral de la COOPERATIVA MINERA LIMATA LIMITADA, con dirección legal es Av. Arenales Nro. Sn Barrio Central (a Una Cdra. Del Parque Industrial Ananea) en Puno / San Antonio De Putina / Ananea, como se puede ver en el capítulo anterior.

#### **4.2 UNIDADES LITOLÓGICAS**

En el área de estudio afloran rocas de edad que van desde el Paleozoico Inferior (Ordovícico) hasta el Cenozoico (Terciario Superior). Depósitos de origen glacial y aluvial de gran potencia están limitados a la depresión de Crucero-Ananea y de menor magnitud al fondo de los valles.

## Formación Sandía

La litología consiste de limolitas pizarrosas de color gris oscuro intercaladas con capas de areniscas de grano fino y color gris clara. Estas rocas son las portadoras de los yacimientos de oro, por lo que se considera como una formación con valor económico.

## Formación Ananea

Litológicamente consiste de pizarras color gris oscuro, en paquetes de 20 hasta 80 cm. El mayor afloramiento está en la zona de Rinconada.

### 4.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Tabla 6

Análisis granulométrico de gravas auríferas

Malla	Tamaño mm	Producto	Peso %
4	5	Grava	64,9
-4 + 8	-4,699 + 2,362	Arena gruesa	6,2
-8 + 28	-2,362 + 0,589	Arenas finas	0,7
-28 + 48	-0,589 + 0,295	Arenas finas	9,7
-48 + 100	-0,295 + 0,149	Arenas finas	13,6
-100 m + 150 m	-0,149 + 0,105	Arenas finas	2,6
-150 m	- 0,105	Arenas finas	2,3

Fuente: Cooperativa Minera Limata. Puno

Tabla 7

Análisis químico de la muestra de mineral

<b>Au</b>	<b>Pb</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Fe</b>	<b>As</b>	<b>Sb</b>
<b>(g/t)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>	<b>(%)</b>
0,4	0,11	0,11	0,07	10,83	0,19	1,5

Fuente: Cooperativa Minera Limata. Puno

#### 4.4 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

La muestra correspondiente al mineral de oro se ha estudiado mediante el microscopio de luz polarizada por el método de reflexión. Para ello previamente se ha confeccionado la sección pulida y sobre la base de ésta se han determinado sus respectivos integrantes mineralógicos; es decir, se hizo la caracterización y a partir de ésta se procedió a ejecutar el análisis modal. Los resultados de los diferentes pasos se encuentran especificados a continuación.

La composición de la muestra según difracción de rayos x es la que se indica en la Tabla 8.

Tabla 8

Composición de la muestra

Mineral	Formula	%
Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	91,74
Ortoclasa	(K,Ba,Na) (Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	3,84
Algirita	NaFeSi <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	0,88
Lepidocrosita	FeO(OH)	0,81
Muscovita	KAl <sub>2</sub> Si <sub>3</sub> AlO <sub>10</sub> (OH) <sub>2</sub>	0,67
Pirita	FeS <sub>2</sub>	0,61
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,57
Eucryptita	LiAlSiO <sub>4</sub>	0,51
Cloromagnesita	MgCl <sub>2</sub>	0,37

Fuente: Cooperativa Minera Limata. Puno

#### 4.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El mineral problema corresponde a la Cooperativa Minera Limata (Ver figura 25), ubicada en la ciudad de Juliaca departamento de Puno. El ensaye químico de la muestra de mineral de cabeza analizado se indica en la Tabla 7.



Figura 25. Minera Aluvial de la Cooperativa Limata

Fuente: Cooperativa Minera Limata. Puno

#### **4.5.1. Primera prueba en concentrador Falcon**

##### **Etapa de Preparación de Mineral**

El mineral fue preparado a una granulometría de 100 % malla -8, para ello se redujo a 15 kilos de muestra original de los 360 kilos obtenidos de la Empresa Minera Limata. Después, se preparó 12 muestras de 450 gramos de mineral cada uno, para la etapa posterior usando el concentrador centrífugo falcon modelo L-40 (ver Figura 26).



Figura 26. Equipo falcon de Laboratorio

Fuente: (s.f.). Equipo falcon modelo L-40. Recuperado de <http://www.laboratoriosanaliticosdelsur.com>

##### **Etapa de Concentración Centrífuga falcon**

Aquí el mineral preparado en la etapa de anterior, se forma una pulpa, es descargada en un pequeño tanque que tiene una agitación constante



con lo cual evita el asentamiento de las partículas. Esto es muy importante porque el equipo falcon requiere una alimentación de pulpa constante para una buena operación.

A continuación se indica en la Tabla 9 y 11, las condiciones de operación realizadas en el equipo falcon y en la Tabla 10 y 12, se presenta el balance metalúrgico de las pruebas ejecutadas.

Tabla 9

*Condiciones de Operación - Granulometría: 100 % - mallas 8*

*Condiciones:*

<b>ETAPA</b>	<b>DILUCION</b>	<b>DENSIDAD DE PULPA</b>	<b>PRESIÓN</b>	<b>GRAVED</b>	<b>AUTOPAC</b>	<b>pH</b>
FALCON	2/1	1350	2,5 PSI	200 G	68	6,8

Fuente: Cooperativa Minera Limata

Tabla 10

*Balance Metalúrgico - Concentrador Falcón*

	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Leyes Au (g/t)</b>	<b>Contenido de finos Au (mg)</b>	<b>% de recuperación % Au</b>	<b>Ratio</b>
Concentrado	15,70	3,49	4,20	0,07	44,96	28,66
Relave	434,30	96,51	0,23	0,10	55,04	
Cabeza calculada	450,00	100,00	0,40	0,18	100,00	

Fuente: Ensayos analizados en el laboratorio analíticos del sur

Tabla 11

*Condiciones de Operación - Granulometría 100% - mallas 8*

*Condiciones:*

<b>ETAPA</b>	<b>DILUCION</b>	<b>DENSIDAD DE PULPA</b>	<b>PRESION</b>	<b>GRAVED</b>	<b>AUTOPAC</b>	<b>pH</b>
FALCON	2/1	1350	3 PSI	200 G	68	6,8

Fuente: Cooperativa Minera Limata

Tabla 12

*Balance Metalúrgico - Concentrador Falcón*

	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Leyes Au (g/t)</b>	<b>Contenido de finos Au (mg)</b>	<b>% de recuperación % Au</b>	<b>Ratio</b>
Concentrado	14,80	3,29	5	0,07	64,43	30,41
Relave	435,20	96,71	0,15	0,07	35,57	
Cabeza calculada	450,00	100,00	0,40	0,18	100,00	

Fuente: Ensayos analizados en el laboratorio analíticos del sur

### **Etapa de Concentración en Canaletas**

El mineral mezclado con agua se desliza por un chute formando una pulpa que pasa por una zaranda (< 5 mm), y se desliza por una canaleta que sostiene las riflerías que sostiene una alfombra donde se obtiene el pre concentrado, esta pulpa que pasa por la canaleta se denomina relave.

Tabla 13

*Condiciones de Operación - Granulometría 100% - mallas 4*

*Condiciones:*

<b>ETAPA</b>	<b>DILUCION</b>	<b>DENSIDAD DE PULPA</b>	<b>pH</b>
Canaleta	3/1	1350	6,8

Fuente: Cooperativa Minera Limata

Tabla 14

*Balance Metalúrgico - Concentrador de canaletas*

	<b>Peso (g)</b>	<b>Peso (%)</b>	<b>Leyes Au (g/t)</b>	<b>Contenido de finos Au (mg)</b>	<b>% de recuperación % Au</b>	<b>Ratio</b>
Concentrado	0,50	3,31	3,00	1,50	35,71	30,20
Relave	14,60	96,69	0,27	3,94	64,29	
Cabeza calculada	15,10	100,00	0,40	6,04	100,00	

Fuente: Cooperativa Minera Limata

## **CAPITULO V**

### **ANALISIS DE RESULTADOS**

#### **Resultados: Pruebas experimentales**

Se realizó pruebas metalúrgicas de análisis granulométrico con gravas auríferas, prueba de concentración gravimétrica del material fino menor a 2,362 mm.

#### **Mineral Aluvial**

Las pruebas se realizaron con gravas auríferas de una mina ubicada a 10 kilómetros de Ananea seca del Río Pucari, la cual es constituida principalmente por alrededor de 64,9 % de grava gruesa (mayor a 5 mm) correspondiendo el resto a material de partículas finas, donde se encuentra el metal valioso, también se observa al microscopio metales pesados como: hematita, magnetita y abundante material de cuarzo, probablemente con los óxidos de hierro estén asociados valores de tungsteno, estaño, rutilo y metales raros. Como indica en la Tabla 6.

## **Comentarios sobre los resultados obtenidos**

En la Tabla 6, nos indica que alrededor de 64,9 % del total corresponde a materiales gruesos, los cuales han sido separados primero mediante por una malla o una zaranda, cualquiera sea el método de beneficio que se adopte posteriormente; haciendo pruebas de laboratorio en un concentrador Falcon y procesándose en la planta de beneficio metalúrgico una fracción menor al 30 % del material total, en esta fracción se encuentra el oro nativo.

Se considera aproximadamente el 80 % del oro total está libre (liberado de su ganga) concentrándose y amalgamándose al 68 % y el 32 % del oro total se va al relave, estimándose que en las condiciones que están trabajando actualmente estas pérdidas estén en magnitudes del 20 % al 35 % del oro total.

Este tamaño de oro y otras partículas en forma laminar debido a su forma y escaso peso, agravado por que los metales nativos especialmente el oro tiene flotabilidad natural, se perderán irremediablemente en un proceso, gravimétrico convencional como el usado actualmente.

## **Alternativa de beneficio metalúrgico**

Para optimizar los resultados metalúrgicos en el tratamiento de minerales aluviales, se debe seguir las alternativas de beneficio que a continuación se indica:

- Concentración gravimétrica en combinación con fuerza centrífuga para captar el oro fino (concentrador Falcon) en este caso evitar el uso de mercurio para recuperar el oro.

La concentración de minerales aluviales en canaletas tiene recuperaciones hasta el 35,71 %, considerando en el proceso el concentrador Falcon variando la presión de agua de 17236,9 Pa (2,5 psi) a 20684,3 Pa (3 psi) llegamos a recuperaciones entre 44,96 % hasta 64,43 % respectivamente.

## **CONCLUSIONES**

De la experimentación metalúrgica a escala laboratorio con la muestra mineral aluvial de la Cooperativa "Minera Limata" Ltda., se concluye lo siguiente:

Las variables más influyentes en el trabajo de la centrifuga Falcon, es la presión de agua, también puede influir el tamaño de alimentación, ya que por sí mismas generan importantes cambios en la variable respuesta.

Cuando la carga se reduce a 100 % - mallas 8, se alcanza muy buena liberación de valores, y en estas granulometrías se logran las máximas recuperaciones, trabajando entre 17236,9 Pa (2,5 psi) a 20684,3 Pa (3 psi) de presión de agua y 200 G de fuerza centrífuga.

El uso del centrífugo Falcon de cargas auríferas puede permitir recuperaciones de oro elevadas, respecto al total del metal precioso alimentado al proceso.

La concentración centrífuga, por ser considerada como una tecnología que no contamina el medio ambiente, constituye una alternativa real para el procesamiento de pasivos ambientales donde los valores se encuentran en granulometría fina.

Los resultados obtenidos con varias muestras, del sector de la minería cooperativa, muestran que pueden ser reprocesados aplicando procedimientos nuevos cuyos flujos gramas utilicen equipos centrifugadores que permiten recuperar valores en el rango de tamaños muy finos.

De acuerdo a los resultados de tratamiento, se tendrían lograr ventajas como:

- Incremento en la extracción del oro en un 35,71 % a 64,43 % adicional al producido actualmente de 28,72 %.
- Mejoras económicas para la zona de producción.

Para optimizar la recuperación del oro fino en los lavaderos auríferos previa evaluación económica, la tendencia debe ser optar por beneficiar metalúrgicamente de acuerdo al diagrama de flujo.



La concentración gravimétrica se fundamenta en la diferencia de peso específico entre la ganga y el mineral aurífero (15,3 a 19,3); por ello es importante que el metal precioso este liberado de los acompañantes, y su tamaño no sea inferior a 30 micrones.

Finalmente, debemos concluir que cualquier estudio que se haga para mejorar la extracción del oro, producto que ocupa el tercer lugar dentro de nuestras exportaciones debe tener el máximo apoyo de todos los peruanos.

## RECOMENDACIONES

Conocer las características de los depósitos minerales y sus asociaciones con los minerales que determinaran los métodos de minado, requerimientos en los procesos de extracción y el rendimiento de los procesos. Por ello es importante considerar las características del mineral a procesar, considerando en primera instancia la mineralogía de procesos.

Los granos de oro nativo han sido reconocidos que contienen alrededor de 99,8 % de oro. Pero la mayoría varía entre 85 – 95 % de oro, con plata como principal impureza. El oro liberado puede ser recuperado fácilmente por concentración gravimétrica a tamaños y partículas sobre el 0,01 mm, motivo necesario para introducir esta tecnología del uso de concentradores centrífugos.

Su principal campo de aplicaciones es en la recuperación de oro libre grueso de depósitos aluviales (morrenas). El tipo de equipos usados es muy variable e incluye: mesas gravimétricas, jips, espirales, tambores rotatorios y muchos más, con algunas variantes.

Se recomienda usar después de un concentrador centrífugo, una mesa gravimétrica para limpiar los concentrados.

En la última etapa del proceso consiste en la obtención del dore a través de los procesos de amalgamación y refogado, para ello usan retortas para recuperar el mercurio amalgamado y disminuir la emisión al ambiente debido a ser un elemento sumamente contaminante y perjudicial para el medio ambiente, por lo que se recomienda ya no usar mercurio; pasando el concentrado obtenido en las canaletas por un concentrador centrífugo luego una mesa gravimétrica, para fundir estos nuevos concentrados y obtener el dore luego es a través de la refinación tener el oro con purezas 99 %. Ver Figura 27.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Casseres Carrisso Regina Coeli, Pinto Chaves Arthur, Mecanismos Actuantes na Concentração Gravítica e Principais Equipamentos Utilizados na Concentração Centrifuga, Série Tecnologia Mineral.

Clifoord D., Concentración Gravimétrica, Mining Journal – Edición en español, Septiembre, 1999.

Chamberlain P. and Pojar M.(1981) “ Gold and silver leaching practices in tehe United States” In: Gold andl silver. Leaching, recovery and economics, Schlitt, Larson and Hiskey (Editors), Proceedings from the 110th AIME Meeting, Lucas-Guin, Co., New Jersey, p.7.

FALCON CONCENTRATORS INC, Manual de Operación del Centrifugador Falcon Modelo SB40.

Fedotov K. V., Beloborodov V. I., Leonov S. B. and Iestra K. H., Recovery of fine gold using efficient gravity separators, Proceedings of the IMPC, Aachen, 21 – 26 September 1997.

Hinojosa D. Jaime, Diagnostico socio económico de la minería aurífera primaria en la Provincia Larecaja: Sector Yani Liguata, Departamento de La Paz, 1996, MEDMIN – COTESU, La Paz – Bolivia.

Hinojosa O., Salas A. Concentración centrífuga de menas estanníferas, III Congreso Nacional de Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Oruro – Bolivia, 1998.

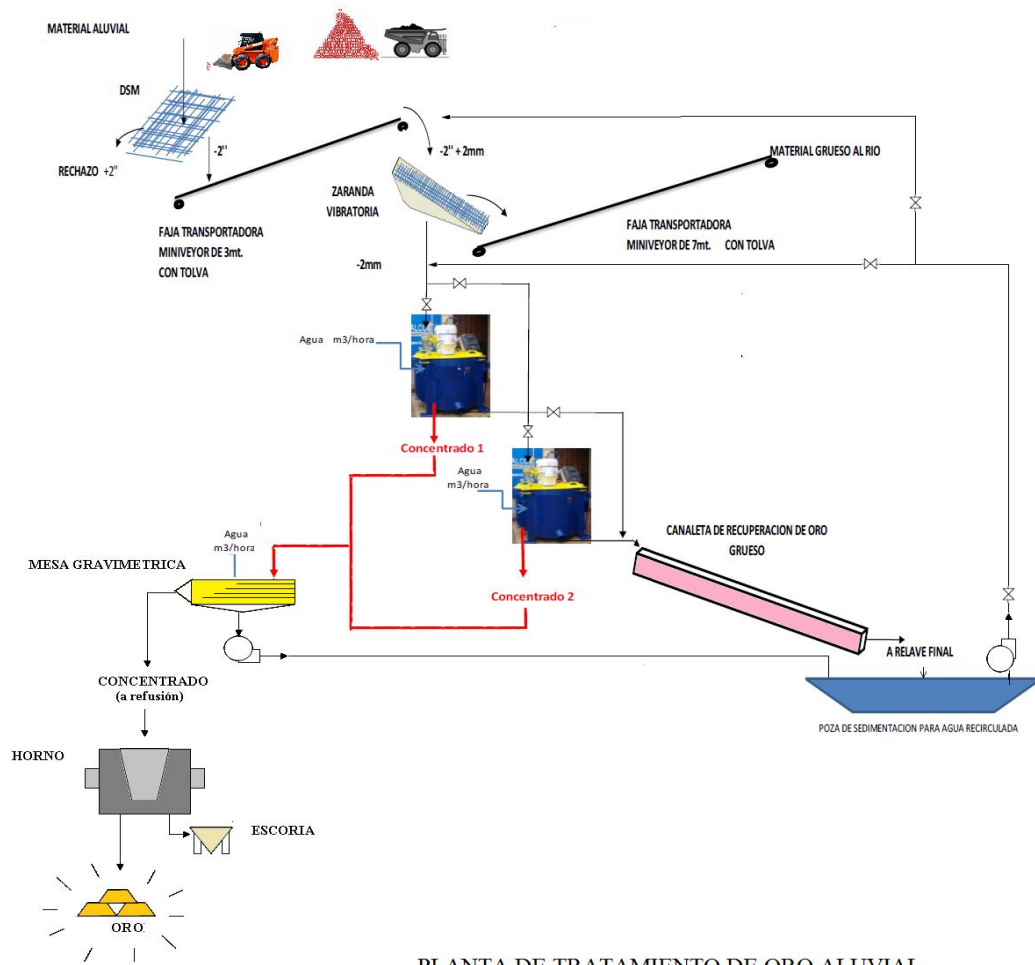
Montealegre J. Raúl, Diseño Experimental con Aplicaciones a la Metalurgia Extractiva, Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico OEA, Proyecto Multinacional en Concentración deMinerales.

Mozley Multi-Gravity Separator Systems, Richard Mozley Limited 8)  
Roche MT Workshop 2002-Gold Coast, A new world of mineral  
processing solutions, Roche Mining, a Division of Downer edit Limited,  
Mineral Technologies.

Taggart, Arthur F., Elementos de Preparación de Minerales, Ediciones  
Interciencia, 1968, Madrid.

# ANEXOS

## ANEXO 1



PLANTA DE TRATAMIENTO DE ORO ALUVIAL

Figura 27. Proceso alternativo del proceso de oro aluvial

Fuente: Dr. Ing. Osvaldo Pavez (2005). Flow sheet de tratamiento de oro aluvial. Apuntes de concentración de minerales II. Chile

## ANEXO 2



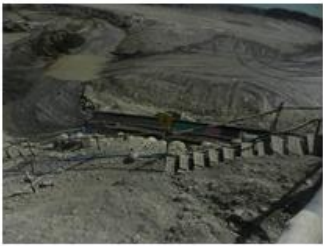
MINA



DESCARGA DE MINERAL  
EN CHUTE



CANALETA



RELAVES



TRASLADO DE PARTICULAS  
MAYORES A 0.5 cm

Figura 28. Fotos del Proceso de la Cooperativa Limata

Fuente: Cooperativa Minera Limata



### ANEXO 3

Tabla 15

*Especificaciones del concentrador falcon L-40*

MODELO DE CONCENTRADOR FALCON L - 40	
Capacidad recomendada de solidos	0 – 0,25 t/h
Capacidad máxima de pulpa	2,3 m <sup>3</sup> /hr
Área de superficie de concentración	0,03 m <sup>2</sup>
Rango de fuerza G	Superior: 200
	Inferior: 50
Peso de la maquina	35 kg
Potencia del motor	0,4 (0,5) KW (HP)
Consumo de agua del proceso	0,24 – 1,2 m <sup>3</sup> /hr
Presión de abastecimiento de agua	2 – 3 Bar
Tamaño máximo de partículas recomendadas para alimentación	1,0 mm
Tamaño absoluto máximo de partículas para alimentación	1,5 mm
Porcentaje máximo de sólidos para alimentación	55 – 70 %
Volumen de descarga de lodo concentrado	1 litro
Volumen de descarga de concentrado de solidos	120 cm <sup>3</sup>
Dimensiones	Ancho: 0,49 m
	Longitud: 0,31 m
	Altura: 0,51 m

Fuente: Ing. Armando Alvarez Q. (2006). Manual de especificaciones del concentrador falcon L-40. Tecnología de la concentración centrifuga. La paz – Bolivia



