

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

ESTUDIO DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA DE SEDIMENTOS ALUVIALES DEL RÍO NAMBIJA MEDIANTE CONCENTRADOR KNELSON

CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA DE ALUVIALES

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA QUÍMICO**



ÓSCAR ROBERTO VARELA ZAMBRANO

oscar.varela@epn.edu.ec



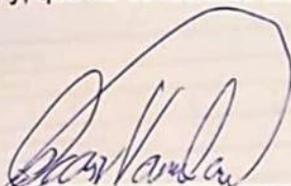
DIRECTOR: EDDY FERNANDO PAZMIÑO IBARRA

eddy.pazmino@epn.edu.ec

DMQ, septiembre, 2022

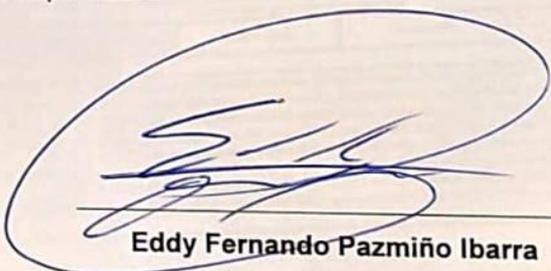
CERTIFICACIONES

Yo, Óscar Roberto Varela Zambrano declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



Óscar Roberto Varela Zambrano

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Óscar Roberto Varela Zambrano, bajo mi supervisión.



Eddy Fernando Pazmiño Ibarra
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Óscar Roberto Varela Zambrano

Luis Andrés Ullauri Zabala

Eddy Fernando Pazmiño Ibarra

DEDICATORIA

A mis padres, gracias por el apoyo durante todos estos años.

AGRADECIMIENTO

El presente Trabajo de Integración Curricular tuvo colaboración del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), se agradece a todo su personal por poner a disposición sus instalaciones, equipos y su tiempo, en especial para el desarrollo del ensayo de recuperación de oro por gravedad (GRG).

A todas las personas que conforman el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional, gracias por su excelso recibimiento mientras formé parte de dicha institución. Destaco al grupo estudiantes de la maestría de Metalurgia Extractiva, conformado por Carlos, Fernando, Katherine y Verónica, gracias por sus consejos, amistad y ayuda en los primeros pasos de mi carrera profesional; gracias a Wilmer, por la amistad y todos los consejos prácticos que serán útiles el resto de mi vida; al ingeniero Eddy Pazmiño por la confianza y la tutoría en el desarrollo del Trabajo; a Diana por ser una gran compañera y la colaboración en varias de las tareas de este Trabajo.

A Luis Andrés Ullauri por ser un buen amigo y un excelente mentor, gracias por toda la dedicación, el éxito de este Trabajo se debe a tu enorme colaboración y empeño.

A mis amigos, quienes estuvieron desde el principio hasta el final, por muchos años más.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	¡Error! Marcador no definido.
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VII
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	4
2.1 Caracterización y procesamiento de muestra aluvial.....	12
2.2 Ensayo de oro recuperable por gravedad (GRG)	13
2.2.1 Primera etapa de ensayo GRG.....	16
2.2.2 Segunda etapa de ensayo GRG.....	17
2.2.3 Tercera etapa de ensayo GRG	19
2.3 Análisis de oro recuperado.....	20
2.3.1 Ensayo al fuego.....	20
2.3.2 Absorción atómica.....	23
3.1 Resultados	24
3.1.1 Resultados de FRX y DRX	24
3.1.2 Resultados del ensayo GRG etapa 1	25
3.1.3 Resultados del ensayo GRG etapa 2	26
3.1.4 Resultados del ensayo GRG etapa 3	27
3.1.4. Recuperación global del ensayo GRG	29
3.1.5 Comparación del concentrador KNELSON con equipos de concentración gravimétrica (Concentrador Zetas).....	29
3.2 Conclusiones	32
3.3 Recomendaciones	33
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34
5 ANEXOS	36

RESUMEN

El presente Trabajo de Integración Curricular comprendió el estudio de concentración gravimétrica de sedimentos aluviales del Río Nambija mediante concentrador KNELSON. En Ecuador, la minería artesanal es una actividad en crecimiento, se emplean diferentes métodos para la recuperación de oro aluvial basados principalmente en la diferencia de gravedad específica entre el oro y la ganga para su separación. En la minería artesanal, se usa mercurio para la recuperación de oro grueso mediante amalgamación, sin embargo, el uso de mercurio está restringido por su toxicidad. La alternativa a la concentración gravimétrica es la concentración centrífuga, para recuperar oro fino (entre 38 a 2 μm) al variar la fuerza gravitacional (G). Para el componente se aplicó el ensayo de oro recuperable por gravedad (GRG), el ensayo consiste en tres etapas de procesamiento de mineral donde se evaluaron condiciones como flujo de equipo y material aluvial o tamaño de partícula. Los productos del ensayo GRG fueron concentrado de mineral y relave de cada etapa; se realizaron análisis de ensayo al fuego y absorción atómica para determinar el contenido de oro en los productos. En las etapas 1, 2 y 3 se obtuvieron concentraciones en g Au/t mineral de 0.91, 4.35 y 0.36 respectivamente. Se recuperaron 1.36 mg de oro (50,19%) en las tres etapas, la etapa con mayor recuperación de oro fue la etapa 2 con 0.85 mg de oro, las condiciones más importantes de la etapa 2 fueron: d_{50} menor a 75 μm y porcentaje de sólidos en la alimentación del 40%.

PALABRAS CLAVE: Mineral aluvial, concentración centrífuga, ensayo GRG, gravimetría, concentrador KNELSON

ABSTRACT

The present work focused on the study of gravimetric concentration of alluvial minerals deposits of the Nambija River in a KNELSON concentrator. In Ecuador, artisanal mining is a growing activity. There are several alluvial gold recovery methods, most of them use the difference in specific gravity between gold and its gangue for its separation. In artisanal mining, mercury is used for the recovery of gold through amalgamation. However, the use of mercury is restricted as it is a toxic metal. The alternative to gravimetric concentration is centrifugal concentration. Centrifugation allows to recover fine gold (between 38 to 2 μm) by varying the gravitational force (G). The gravity recoverable gold (GRG) assay was applied to the component. The assay consists of three mineral processing stages where conditions such as equipment flow and alluvial material or particle size were evaluated. The products of the IBC test were ore concentrate and tailings from each stage; Fire assay and atomic absorption analyzes were performed to determine the gold content in the products. In stages 1, 2 and 3, concentrations in g Au/t mineral of 0.91, 4.35 and 0.36, respectively, were obtained. 1.36 mg of gold (50.19%) were recovered in the three stages, the stage with the highest gold recovery was stage 2 with 0.85 mg of gold. The main conditions of stage 2 were: d_{50} less than 75 μm and percentage of solids in the feed of 40%.

KEYWORDS: Alluvial ore, centrifugal separation, GRG assay, Gravimetric analysis, KNELSON concentrator.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El componente consiste en evaluar el porcentaje de oro recuperado de material aluvial extraído del biofiltro y canal construido en las riberas del Río Nambija. El material escogido para el desarrollo del componente es parte de un área estudiada para la creación de un biofiltro que ayuda la retención de metales pesados y disminución de metales pesados en el agua del Río Nambija. En este estudio, se aplicó el ensayo de oro recuperable por gravedad (GRG, siglas en inglés para Gravity recoverable gold), para llevar a cabo el ensayo se utilizó el equipo de concentración centrífuga KNELSON KC MD 3, la aplicación de fuerza centrífuga de 60G permite que los metales sean separados de la parte mineral formada principalmente por silicatos, el efecto ocurre por la diferencia de gravedad específica entre metales y ganga. La importancia de realizar el ensayo GRG radica en tener el conocimiento de la ley de corte del mineral al que se le tiene interés en la recuperación de metales como oro y plata, a partir de esta información es posible crear un circuito de recuperación basado en la gravimetría del material. Una parte del componente consiste en comparar la eficiencia del equipo de concentración centrífuga KNELSON con respecto a otras técnicas de recuperación de metales, por ejemplo, la concentración gravimétrica, que emplea equipos como concentradores tipo Zeta y son ampliamente empleados en el campo de la minería artesanal y pequeña minería. El ensayo GRG se desarrolló en tres etapas, se procesaron 20 kg de material aluvial, en la primera etapa se trabajó con un tamaño de partícula inferior a los 850 μm , se formó una pulpa con 40% de sólidos para alimentar al concentrador KNELSON, cuyas condiciones de operación en la primera etapa fueron de 25 kPa en presión del flujo de agua y una velocidad aproximada de 400 RPM; los productos de cada etapa fueron el material concentrado que se retiene en la cámara del concentrador y una muestra representativa de las colas o relave; la segunda etapa se llevó a cabo al procesar el relave de la primera etapa, el relave de la primera etapa llevó a molienda para obtener material con un d_{50} menor a 75 μm , en la segunda etapa la presión de flujo de agua fue de 25 kPa; la tercera y última etapa se operó con el relave de la segunda etapa, el material pasó por molienda hasta obtener un d_{80} menor a 75 μm , la condición de presión de flujo de agua de la última etapa fue de 12 kPa. Se analizaron las concentraciones de oro de los concentrados y relaves de cada etapa del ensayo GRG, las muestras se llevaron a ensayo al fuego y finalmente a absorción atómica.

El ensayo GRG se realizó en las instalaciones del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), los análisis de concentrados y relaves por ensayo al fuego y absorción atómica se realizaron en el Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional.

1.1 Objetivo general

Aplicar el ensayo estándar de oro recuperable por gravedad (GRG) en el equipo KNELSON KC MD 3 para un sedimento aluvial procedente del Río Nambija, para evaluar la influencia del tamaño de partícula en el ensayo GRG; así, poder contrastar la recuperación tradicional con métodos de concentración gravimétrica centrífuga del material sedimentado aluvial procedente del Río Nambija mediante la caracterización de las fracciones de concentrado y relaves obtenidos en cada etapa del ensayo GRG.

1.2 Objetivos específicos

1. Evaluar las condiciones de operación para el concentrador KNELSON KC MD 3 en los ensayos GRG para las tres diferentes etapas y un tamaño de partícula inicial de 850 μm .
2. Reportar los porcentajes de recuperación de oro de sedimentos aluviales a partir del concentrado obtenido en cada etapa del ensayo GRG.
3. Determinar la influencia de la reducción del tamaño de partícula en cada etapa (de 850 μm a menos de 75 μm en la segunda y tercera etapa) en el porcentaje de recuperación de oro.
4. Comparar los resultados de recuperación de oro del ensayo GRG obtenidos en el concentrador KNELSON KC MD 3 con otros valores bibliográficos de alternativas de recuperación gravimétrica de oro aluvial empleadas en la minería artesanal, por ejemplo, los concentradores Zeta

1.3 Alcance

El trabajo de investigación se realizó en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), y en el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), por la disponibilidad del equipo de concentración centrífuga KNELSON de laboratorio. El Trabajo de Integración curricular fue financiado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

a) Procesamiento inicial de sedimentos aluviales

Para el sedimento aluvial del Río Nambija se aplicaron procesos de homogeneización y cuarteo para obtener una muestra representativa de 50 kg, se pasó el material por un tamiz para tener un tamaño de partícula inicial inferior a las 2 mm. El material que fue alimentado a la primera etapa del ensayo de oro recuperable por gravedad tuvo un tamaño de partícula inferior a los 850 μm , se alimentó al concentrador KNELSON 20 kg con un porcentaje de sólidos del 40%.

b) Proceso de molienda de material

Se procesó el material sedimentado aluvial del Río Nambija a ensayos de molienda en húmedo (62,5% sólidos). Se realizaron tres ensayos en un molino de bolas, el objetivo de los ensayos fue determinar el tiempo de molienda óptimo para alcanzar el tamaño de partícula para las etapas 2 y 3 del ensayo GRG.

c) Evaluación de etapas de reciclo en concentración gravimétrica

La primera etapa del ensayo GRG se realizó con un tamaño de partícula de material menor a 850 μm , 40% de sólidos, un flujo de agua de 3.5 L/min y a una presión de fluidización de 25 kPa. El relave. La segunda etapa consistió en la alimentación del relave de la primera etapa, con un tamaño de partícula que tuvo un d_{80} menor a los 75 μm , flujo de agua de 3.5 L/min y presión de fluidización de 25 kPa. La última etapa fue alimentada con el relave de la segunda etapa, con un d_{80} inferior a los 75 μm , flujo de agua de 3.5 L/min y presión de 12 kPa. Se obtuvieron muestras de concentrado y muestras representativas de los relaves de cada etapa y serán llevadas a análisis de caracterización

d) Caracterización de concentrado y relaves

Para las muestras de concentrados y relaves de todas las etapas del ensayo GRG, se realizaron ensayos al fuego y absorción atómica con el objetivo de evaluar la cantidad de oro recuperado; además, se reportan los porcentajes de oro recuperado en cada etapa para determinar la influencia de la reducción del tamaño de partícula en la recuperación de oro por concentración centrífuga.

e) Evaluación de la eficiencia de recuperación

Se compararon los resultados del ensayo GRG con valores de bibliográficos de ensayos de concentración en Zetas, con el objetivo de brindar una alternativa tecnológica a la recuperación de oro aluvial a escala artesanal.

1.4 Marco teórico

La minería se ha convertido en una actividad de vital importancia para el desarrollo económico y político en varios países, la demanda de minerales y metales cada vez incrementa por factores como avances tecnológicos. La minería se desarrolla a pequeña, mediana y gran escala o de manera artesanal; la minería artesanal se caracteriza por operar sin los estándares industriales, es ejecutada por obreros sin experiencia minera y en varios casos se realiza sin ningún permiso legal. En Ecuador, se registran varios sectores con actividades mineras a nivel artesanal legales e ilegales; en las colinas de Zaruma y Portovelo de la provincia de El Oro han existido problemas causados por la minería, especialmente la ilegal. Entre el 2015 a 2019, se han registrado hundimientos geológicos en el centro histórico de Zaruma por el colapso de túneles de minería, además, en los ríos del sector se emplea mercurio para conseguir la amalgamación del oro aluvial. (Ammirati et al., 2020)

En las zonas mineras del Ecuador, los mineros buscan extraer el oro aluvial por ser una opción viable a escala artesanal. Se define como oro aluvial a los yacimientos formados en las cercanías de un río o cuando en las cercanías del río existe la presencia de minerales cuya caracterización contiene oro. Los tipos de oro aluvial que se encuentran son el oro placer eluvial o residual, aparece por la erosión de la mena que contiene al oro; los depósitos placer coluvial y proluvial se forman por movimiento del terreno por deslizamientos o el cambio del caudal del río; finalmente se puede encontrar el depósito

corriente con placer fluvial, por la densidad del oro se encuentra en el fondo del río. La Figura 1.1 presenta el esquema de formación de depósitos de oro aluvial. (Acosta Fiallos & Feijoo Loayza, 2020)

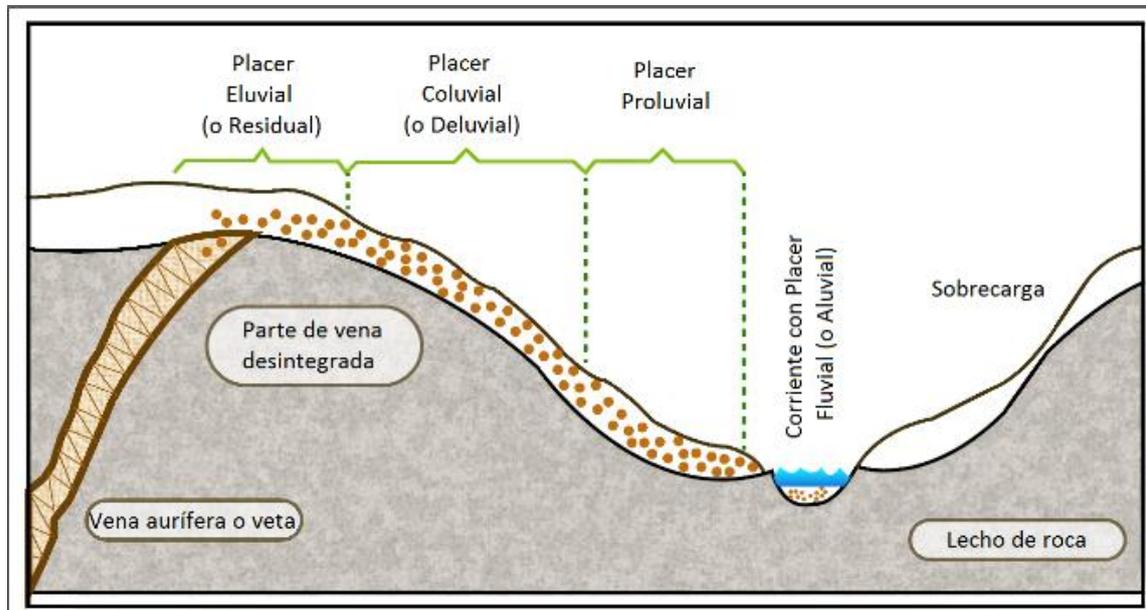


Figura 1.1. Proceso de formación de placeres aluviales de oro (Marsden, 2006)

La amalgamación consiste en la formación de una aleación entre mercurio con un metal, por ejemplo, el oro. La amalgamación entre el oro y el mercurio ocurre por la formación de enlaces metálicos y la alta mojabilidad que el oro presenta al tener contacto con el mercurio, los compuestos que se obtienen de la amalgama son $AuHg$, Au_2Hg y Au_3Hg ; estos compuestos pueden tener hasta un 70% de oro en peso. La recuperación del metal de interés se realiza al exponer a la amalgama a una temperatura mayor a los $360\text{ }^{\circ}\text{C}$, con el fin de evaporar el mercurio. (Valderrama et al., 2012) El mercurio es considerado como un metal tóxico, la exposición a este metal provoca alteraciones al sistema nervioso, daños a los órganos del sistema respiratorio, renal, digestivo y al desarrollo de niños en edad temprana. Los registros de concentraciones de mercurio en zonas mineras del Ecuador superan los límites establecidos por la OMS de 0,006 ppm; en el Estero Salado y en el Golfo de Guayaquil de la provincia del Guayas se han registrado concentraciones de 0,657 ppm hasta 1,645 ppm, la contaminación en estos lugares ocurrió por actividades mineras en mayor parte ilegales. (Venegas & Yépez, 2022)

En Ecuador, en la minería artesanal y pequeña minería en el cantón Ponce Enríquez utilizan la amalgamación como método de recuperación de oro por el alto porcentaje de recuperación de oro y la separación sencilla del mercurio. UNEP (2005), estima que para la recuperación de 1 kg de oro requiere de hasta 2 kg de mercurio, además, solo el 12%

de las personas que aplican amalgamación en las minas de Ponce Enríquez usa respirador para gases, y 90 % de las personas involucradas en la minería en Ponce Enríquez no tiene conocimiento de técnicas alternas a la amalgamación para recuperar oro. (Carrillo & Astudillo, 2011)

Una de las técnicas que son alternativas al uso de mercurio es la concentración gravimétrica, esta técnica consiste en separar el oro del mineral por la diferencia de gravedad específica entre ambos, la gravedad específica del oro es de 19.3, mientras que la gravedad específica de un mineral como el silicato es de 2.65. Las variables que se consideran para la concentración gravimétrica son el mineral que acompaña al oro, el grado de liberación de las partículas de oro y su forma, el porcentaje de sólidos de la pulpa procesada, la viscosidad de la pulpa, el tamaño de partícula del oro, entre otros. (Martinez et al., 2021)

En la minería artesanal se utilizan equipos basados en concentración gravimétrica con el objetivo de evitar el uso de mercurio; por ejemplo, las mesas sacudidoras tienen una superficie inclinada con rifles colocados horizontalmente, la mesa opera con una pulpa de porcentaje de sólidos entre el 20% a 35%, el movimiento de la mesa provoca que el material se desplace por la mesa y los rifles impidan que los metales descendan por su alta gravedad específica, son recuperados en la parte opuesta de la alimentación de la muestra. Se han registrado en puntos mineros de Ecuador y Colombia el uso de celdas de flotación, después de reducir de tamaño con molienda al material, se agrega a la pulpa surfactantes y floculantes con el objetivo de separar sulfuros, carbonatos, óxidos o fosfatos de los metales, el proceso aprovecha la repulsión al agua de ciertos minerales. (Veiga et al., 2018)

En el cantón Nambija, provincia de Zamora Chinchipe, se presenta uno de los yacimientos de oro aluvial más grandes en el país, gracias a la erosión y formación de rocas metamórficas. La presencia de oro aluvial es aprovechada por los mineros artesanales de la zona, para la recuperación del oro emplean equipos que emplean la concentración gravimétrica, entre ellos está el concentrador tipo Zeta. La "Zeta" consiste en dos o más canalones de entre 4,5 y 5,4 m de largo y 0,54 m de ancho que están colocados con una inclinación entre 11 y 30 grados, a mayor grosor del material el ángulo entre canalones incrementa; el equipo está equipado con una tolva, una parrilla para la clasificación del material y un sistema de bombeado para transportar agua para crear un flujo con el material y tener un movimiento a favor de la gravedad. La minería ilegal aplica mercurio en la superficie de las canaletas o directamente al material para intentar amalgamar el oro aluvial. La Figura 1.2 presenta el esquema de un concentrador tipo Zeta (Acosta Fiallos & Feijoo Loayza, 2020)

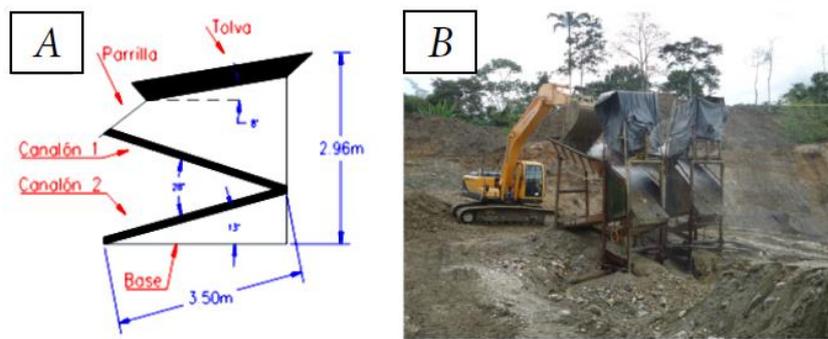


Figura 1.2. A) Esquema de un concentrador gravimétrico tipo Zeta. B) Instalación de Zeta para recuperación de oro. (Acosta Fiallos & Feijoo Loayza, 2020)

En el trabajo de Acosta & Feijoo (2020) se evaluó la eficiencia del concentrador tipo zeta; se enfocaron en dos parámetros de recuperación de oro aluvial en la región de Zamora, según el tamaño de partícula: Oro fino ($<44 \mu\text{m}$) y oro grueso ($44 \mu\text{m}$ a $1000 \mu\text{m}$), también se realizaron ensayos con mercurio en la superficie del concentrador. El estudio concluyó que la operación con caudales altos ($144 \text{ m}^3/\text{h}$) afecta a la recuperación de oro grueso y fino, mientras que la operación con caudales bajos ($84 \text{ m}^3/\text{h}$) perjudica principalmente al oro fino, que fue el más abundante en el mineral de estudio. Se demostró que el equipo es ineficiente para la recuperación de oro, en especial si es de partícula fina, se recomienda encontrar más alternativas para la recuperación de oro.

Otro método para la recuperación de oro en minería es la concentración centrífuga, esta también aprovecha la diferencia de peso entre oro y ganga, la técnica consiste en aplicar una fuerza centrífuga entre 60 a 350 veces mayor a la fuerza gravitacional (G), gracias a la aplicación de fuerzas la separación de partículas se vuelve más sencilla. (Martinez et al., 2021) La concentración gravimétrica se considera como un proceso probabilístico en el que influyen factores del mineral como su gravedad específica, grado de liberación de oro, morfología de partícula, y tamaño. El mejor caso de separación por concentración centrífuga se alcanza cuando se incrementa el número de etapas de separación (Sakuhuni et al., 2016). Entre los equipos de concentración gravimétrica, existen dos equipos que destacan: El concentrador KNELSON ($G=60-120$) y el concentrador Falcon ($G>200$), ambos operan con flujo de agua a presión y contracorriente al mineral alimentado; en la minería artesanal estos equipos pueden procesar entre 0,7 a 15 toneladas de mineral por hora. En estos concentradores los parámetros más importantes para el funcionamiento adecuado son el control del porcentaje de sólidos en la alimentación, el tamaño de partícula en la alimentación, la presión del agua, tiempo de operación y velocidad rotacional. (Martinez et al., 2021)

Los circuitos de concentración centrífuga deben brindar una estimación del porcentaje de recuperación de oro proveniente del mineral procesado antes de operar. El ensayo de oro recuperable por gravedad (GRG por Gravity recoverable gold) provee una cantidad teórica de oro que se puede recuperar con la ayuda de un concentrador centrífugo tipo batch, sea el concentrado KNELSON o Falcon.(Grewal & Kleek, 2009) Existen dos divisiones del ensayo GRG, en una etapa que utiliza 20 kg de muestra y en tres etapas se emplean de 40 a 100 kg. (Dominy, 2014) En el ensayo GRG de tres etapas se requieren las siguientes condiciones iniciales: La primera etapa requiere que el d_{100} de la muestra sea inferior a 850 μm y la alimentación se realiza a una velocidad de 1000 g/min y el flujo de agua opera a 25 kPa; el relave de la primera etapa sirve para la alimentación de la segunda etapa. Las condiciones de la segunda etapa establecen un rango de d_{50} a d_{60} menor a 75 μm , una alimentación de 600 g/min y flujo de agua a 25 kPa, los relaves de esta etapa alimentan la tercera y última etapa; esta opera con un d_{80} menor a 75 μm , 400 g/min de alimentación y el flujo de agua a 12 kPa.(Laplante et al., 1995)

La presente investigación tiene como objetivo realizar la prueba de oro recuperable (GRG) de sedimento aluvial procedente del río Nambija, las pruebas se realizarán en el concentrador KNELSON a escala laboratorio, para evaluar la influencia del tamaño de partícula en el ensayo GRG; así, poder contrastar la recuperación tradicional con métodos de concentración gravimétrica centrífuga del material sedimentado aluvial procedente del Río Nambija mediante la caracterización de las fracciones de concentrado y relaves obtenidos en cada etapa del ensayo GRG.

2 METODOLOGÍA

El estudio de concentración gravimétrica de aluviales del Río Nambija se desarrolló según el método inductivo; en el componente se buscó determinar la influencia de la granulometría del material aluvial en un equipo de concentración centrífuga que se emplea en la recuperación del oro contenido en el mineral. También, se determinó la eficiencia del concentrador KNELSON para la recuperación de oro según el ensayo de oro recuperable por gravedad, con los resultados de recuperación de oro se comparó la recuperación de oro en un concentrador Zeta, con el fin de presentar una alternativa de concentración de oro en la minería artesanal y de pequeña escala. La metodología del componente se compone de los siguientes criterios:

Enfoque

El enfoque cuantitativo consiste en el control y objetivación de los resultados de una investigación, con el propósito de reducir conjeturas e incertidumbre. (Garduño, 2002)

El enfoque del componente es cuantitativo, los datos obtenidos para la elaboración de este trabajo se consiguieron de manera experimental; se realizó el análisis de los resultados con el objetivo de comprobar la influencia del tamaño de la partícula en la concentración de oro y comparar la eficiencia de concentración entre dos equipos.

Tipo de trabajo

El componente se realizó basado en un estudio de caso, para la obtención de los datos del componente se aplicó el ensayo GRG, se estudió la influencia de la variación de tamaño de partícula en cada etapa del ensayo GRG.

Técnica de recolección de información

La información para el desarrollo del componente se consiguió mediante la investigación de fuentes bibliográficas relacionadas al procesamiento de minerales aluviales por métodos de concentración centrífuga y gravimétrica; como también se recopiló información de estudios de casos que emplearon el ensayo GRG para determinar las condiciones de trabajo en el componente.

La Tabla 2.1 contiene la lista de los equipos utilizados en el ensayo GRG, los equipos en la lista son propiedad del Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE).

Tabla 2.1. Equipos utilizados en el ensayo GRG (Propiedad del IIGE)

N°	EQUIPO	CÓDIGO DEL EQUIPO (LABORATORIO)	MARCA	MODELO	FOTO REFERENCIAL
1	Balanza De Máximo 30 Kg	Balanza 1	Mettler	Mettler TE 30	
2	Balanza De Máximo 150 Kg	Balanza 2	Mettler Toledo	BBA231-3B150	
3	BOMBA DE AGUA De 0,5 HP	BOMBA DE AGUA 1	PAOLO	PKm 60-1	 <small>© Artisan Technology Group</small>

4	Estufa De 720 Litros	Estufa 1	Mettler	U 80	
5	Concentrador Centrífugo Nelson	Concentrador Centrífugo 1	Flsmidth	KC-MD3	
6	Filtro Prensa Vymsa	Filtro Prensa 1	Vymsa	Filtro a presión 8" x 14"	
7	Cuarteador De Rifles	Cuarteador De Rifles 1	Humbolt	Canales de apertura de 1/2"	

8	Mesa De Cuatro Rodillos Vymsa	Mesa De Rodillos 1	Vymsa	NA	
---	--	-----------------------	-------	----	--

2.1 Caracterización y procesamiento de muestra aluvial

La zona del Río Nambija está conformada por rocas intrusivas como batolitos, en el perfil aluvial se pueden observar estratos de granos finos y gruesos. El tipo de erosión que se presenta en la zona ocurre por actividades mineras y por el caudal del Río Nambija, el caudal es de tipo cónico en su mayoría y el aumento del flujo por efectos de lluvia provoca mayor erosión en la zonas. Los minerales más comunes en la zona son el cuarzo, biotita, plagioclasas y albita; además de arenas graníticas y ácidas.(Veintimilla, 2014)

El mineral aluvial del Río Nambija fue analizado por fluorescencia de Rayos X (FRX) en el equipo X S8 Tiger y difracción de Rayos X (DRX) en el difractor D8 ADVANCE, con el propósito de conocer su composición elemental y mineral.

El análisis de fluorescencia de Rayos X es una técnica de análisis químico basada en la espectrometría, se emplea para determinar la composición elemental en muestras sólidas. (Preparadas como pellets o pastillas) En minerales, la FRX puede determinar su composición elemental principal, se detectan elementos como Na, Mg, Al, Si, K, P, Ca, Ti, Fe, Mn, entre otros. (Potts & Webb, 1992)

El análisis por difracción de Rayos X se emplea para la caracterización de materiales cristalinos, provee información de la estructura, fases, orientación de cristales y otros parámetros estructurales de un mineral como el tamaño de partícula promedio, cristalinidad, deformación y defectos de cristalinidad. (Bunaciu et al., 2015)

La muestra aluvial para procesar en el componente proviene del estudio de la implementación de un biofiltro en el Río Nambija. El objetivo de procesar el material fue obtener 20 kg para la alimentación de la etapa inicial del ensayo GRG. El material pasó por etapas de homogeneización, cuarteo y separación de partículas mayores a 850 μm ; la Figura 2.1 presenta el método de homogeneización y reducción de muestra para la selección de material a procesar.

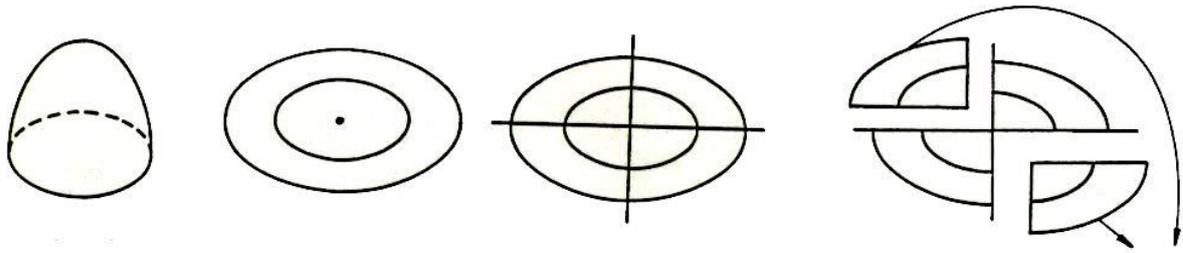


Figura ¡Error! No hay texto con el estilo especificado en el documento..1. Método por cuarteo para preparación de muestras. (De La Torre, 2019)

El método por paleo consiste en mover al material y apilarlo en forma cónica con el objetivo de homogeneizar, se separa el material en cuatro fracciones y de estas se toman dos partes para obtener una muestra representativa, se repite la formación de un cono y la toma de las dos partes del fraccionamiento, se deben elegir las partes opuestas de las que se eligieron en el primer fraccionamiento. (De La Torre, 2019)

Para obtener un tamaño de partícula inferior a 850 μm , todo el material pasó por un tamiz con un número de malla 20 mesh (850 μm según la norma Tyler).

2.2 Ensayo de oro recuperable por gravedad (GRG)

La Figura 2.2 presenta el esquema utilizado para el ensayo GRG en tres etapas.

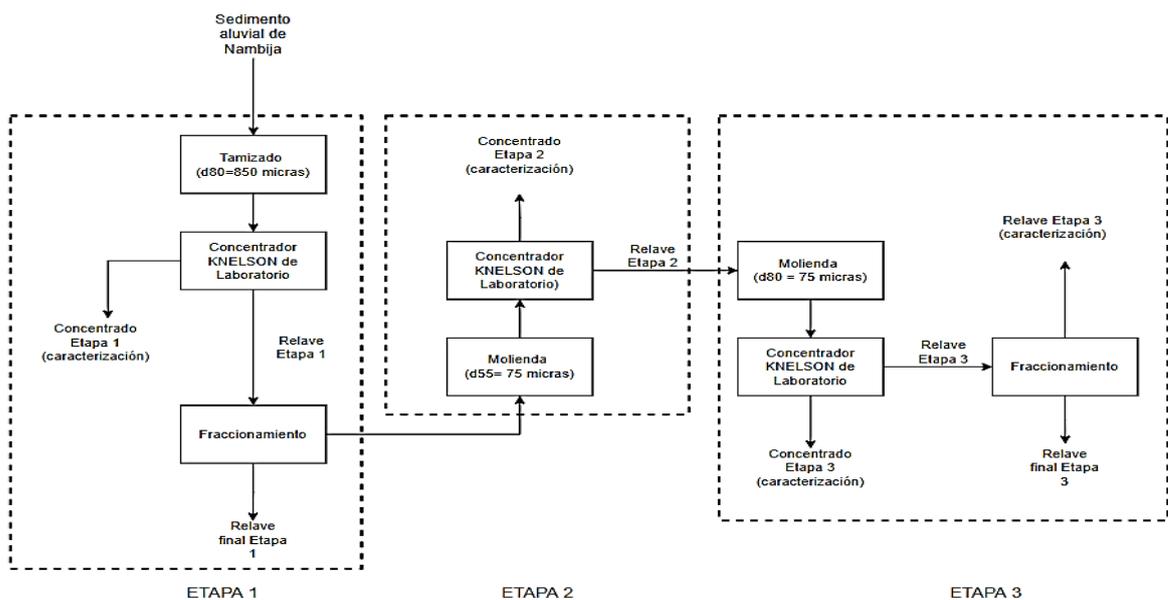


Figura 2.2. Diagrama de bloques para ensayo GRG de tres etapas

El equipo de concentración centrífuga fue KNELSON KC-MD3; este concentrador está conformado por un cono con segmentos horizontales que sobresalen de la superficie de la pared del cono, el cono gira a 400 RPM, lo que genera una fuerza de 60G. Las partículas

pesadas son llevadas a la pared del cono y atrapadas por los segmentos horizontales, esto ocurre debido a que el cono está rodeado por un flujo de agua presurizado que mantiene al material pesado en los segmentos de la pared. Las partículas livianas son arrastradas por el flujo de agua por la parte superior del concentrador. (Silva, 1986 p.22)

La Figura 2.3 presenta el equipo KNELSON KC-MD3 que se empleó para realizar el ensayo GRG en el componente, la Figura 2.4 contiene las partes más importantes del concentrador y la Figura 2.5 indica el funcionamiento de concentración de partículas en las paredes del cono.



Figura 2.3. Equipo de concentración centrífuga KNELSON KC MD 3

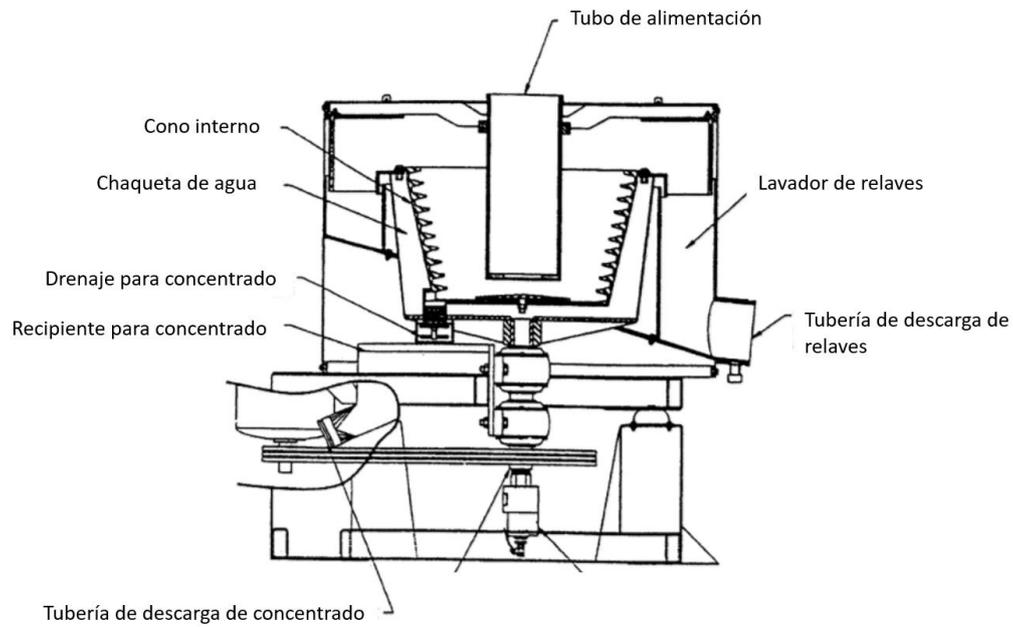


Figura 2.4. Esquema de partes de equipo KNELSON KC MD 3. (Hayes, 2018)

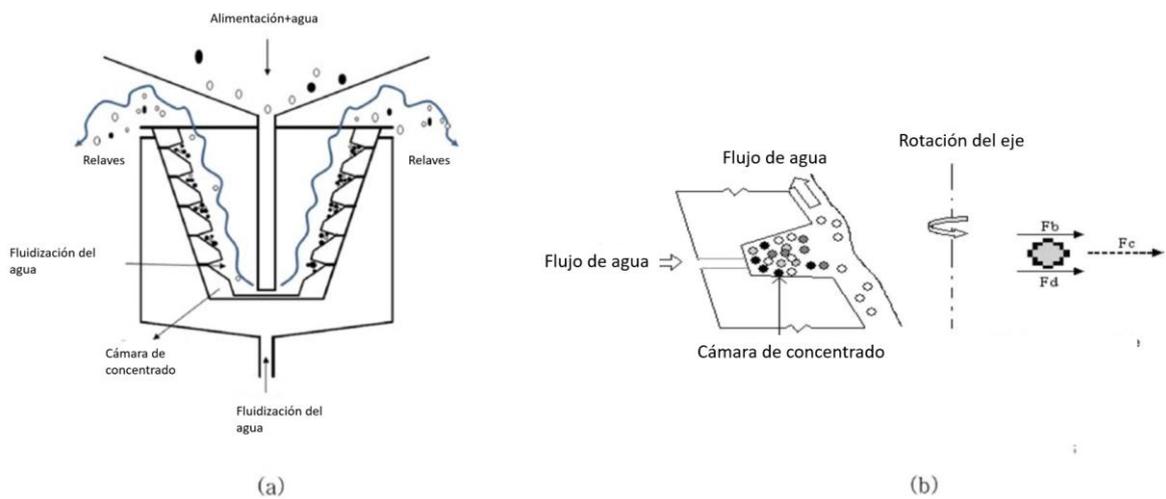


Figura 2.5. a) Gráfico del principio de concentración en equipo KNELSON. b) Diagrama de fuerzas presentes en el cono rotatorio de equipo KNELSON (Kwon et al., 2016)

El concentrador KNELSON presenta una rejilla en la parte superior de la tolva de alimentación con una abertura de 1680 μm para asegurar que se trabaje con material menor a 2 mm. Para retirar el concentrado del equipo se debe realizarlo con el concentrador apagado y sin flujo de agua, el cono rotatorio es removible, por lo que se requiere aplicar un lavado al cono rotatorio para recuperar el concentrado del mineral. Aunque el concentrador KNELSON cuenta con un sistema de drenaje del concentrado en caso de sobresaturación del cono rotatorio, se recomienda recuperar el concentrado al retirar y lavar el cono rotatorio; la alimentación recomendada para evitar la saturación es de 1000 gramos por minuto. (Coulter & Subasinghe, 2005)

En la Figura 2.5 se observa el principio empleado para la concentración de oro en el concentrador KNELSON, cuando las partículas entran al cono rotatorio quedan suspendidas en el flujo de agua y atraviesan el cono en un movimiento helicoidal, las partículas sólidas experimentarían una fuerza de arrastre de flujo (F_d), y la fuerza Bagnold (F_b) que aparece cuando un lecho de partículas se somete a un esfuerzo cortante (F_b es directamente proporcional al esfuerzo cortante), se produce la dilatación del lecho cuando ocurre alteración en la presión de flujo del agua. Las fuerzas de arrastre de flujo y Bagnold son proporcionales a la densidad de partícula, si la sumatoria de ambas fuerzas es igual a la fuerza centrífuga provocada por la rotación del cono, la partícula permanecerá en el cono, caso contrario, será arrastrada por el flujo de agua. (Coulter & Subasinghe, 2005)

Las fuerzas participantes se representan en las ecuaciones [2.1]; [2.2] y [2.3]

$$F_c = m_{particula} r_{cono} \omega_{cono}^2 \quad [2.1]$$

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d^* \cdot \rho_{fluid} \cdot v_{fluid}^2 \quad [2.2]$$

$$F_b \propto \text{Esfuerzo de cizallamiento} \quad [2.3]$$

2.2.1 Primera etapa de ensayo GRG

La Tabla 2.2 presenta las condiciones de operación en la primera etapa del ensayo GRG.

Tabla 2.2. Condiciones de operación para etapa 1 de ensayo GRG

Etapa 1	
Caudal de agua (L/min)	3.5
Granulometría (μm)	<850 (d_{100})
Flujo de alimentación (g/min)	1000

La alimentación del material aluvial en la primera etapa se realizó bajo dos condiciones de porcentaje de sólidos. Los primeros 5 kg se alimentaron a un porcentaje del 100% en sólidos, los 15 kg restantes se ajustaron a una pulpa cuyo porcentaje de sólidos fue del 40%. En ambos casos, se prepararon lotes de 1 kg de material aluvial para alimentar al concentrador, para evitar la saturación del cono rotatorio. Durante la operación del concentrador, se tomaron muestras representativas del caudal de relave para ensayo al fuego y absorción atómica.

Las muestras de concentrado se llevaron a secado en estufa, las muestras de relave representativo se llevaron a filtrado a presión para eliminar el exceso de agua, por último, las muestras de relave se llevaron a secado en estufa a una temperatura entre los 80°C a 100°C. .

2.2.2 Segunda etapa de ensayo GRG

La segunda etapa del ensayo GRG se realizó con el relave de la primera etapa. El material aluvial se llevó a molienda de barras para obtener un tamaño de partícula con un d_{50} menor a 75 μm ; el tiempo de molienda fue de 24 minutos, se determinó el tiempo de molienda mediante la interpolación con datos que se obtuvieron al procesar una muestra del mineral en el molino de bolas del Departamento de Metalurgia Extractiva (DEMEX) de la Escuela Politécnica Nacional. La Figura 2.6 es la gráfica que se obtuvo para determinar el tamaño de partícula deseado (Sea d_{80} o d_{50}) en función del tiempo para un molino de bolas.

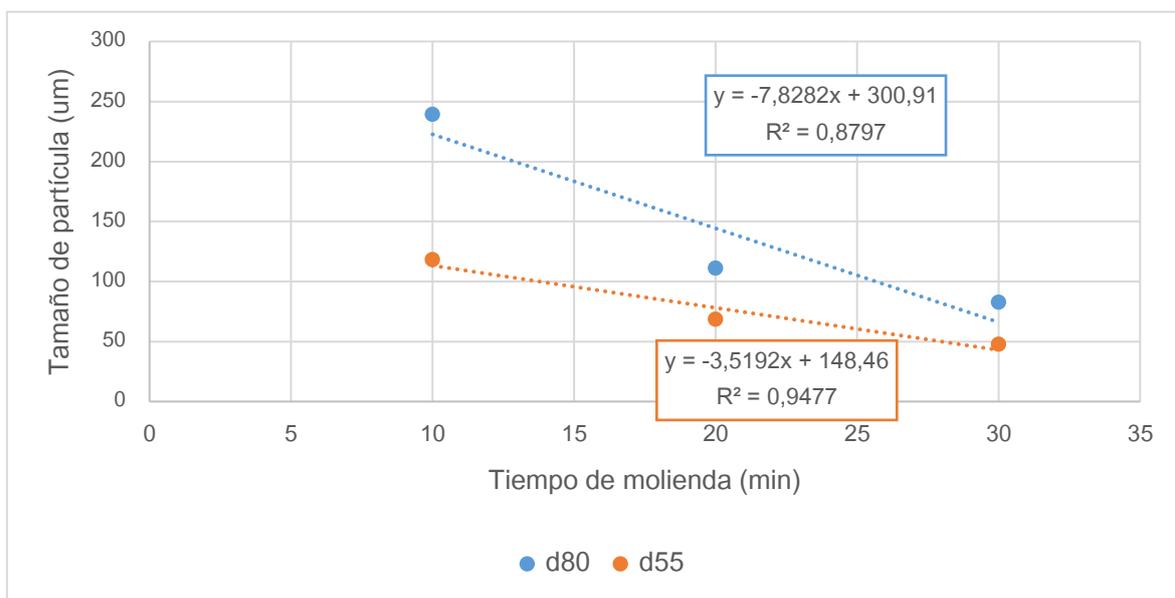


Figura 2.6. Reducción del tamaño de partícula de material aluvial en función del tiempo para el molino de bolas.

En el desarrollo del componente se trabajó con un molino de barras, se realizó una prueba de molienda para la obtención de datos y conseguir el tiempo de molienda mediante interpolación.

La Tabla 2.3 presenta las condiciones de operación del molino de barras en cada tambor

Tabla 2.3. Condiciones de operación de molino de barras para etapa 2

Molienda Etapa 2	
Cantidad de material (kg)	1,6
Porcentaje en sólidos (%)	62,5
Número de barras	24
Peso de barras (kg)	10
Velocidad (RPM)	60

Para la preparación de pulpa en esta etapa, se empleó la balanza Marcy; este equipo se emplea a nivel de laboratorio para ensayos de minerales, la función de la balanza Marcy es determinar la densidad y porcentaje de sólidos de una pulpa, se debe conocer gravedad específica del mineral seco para la toma de la densidad y porcentaje de sólidos de la pulpa. La balanza Marcy cuenta con un vaso de 1 litro de capacidad, cuenta con 2 agujeros en la parte superior, estos agujeros deben cubrirse antes de llenar el vaso con la pulpa, al rebasar los agujeros con la pulpa, se deben destapar los agujeros para eliminar el exceso de pulpa, así, se asegura que el contenido del vaso tiene 1 litro y se procede a tomar la lectura de densidad y porcentaje en sólidos de pulpa. La Figura 2.7 representa a la balanza Marcy con su vaso para pulpa.



Figura 2.7. Balanza Marcy y vaso de pulpa

El material aluvial tiene una gravedad específica de 2.2, para la molienda se ajustó a un porcentaje de sólidos de 62,5% y para el procesamiento de material en el concentrador KNELSON se trabajó con un porcentaje de sólidos de 40%.

La Tabla 2.4 presenta las condiciones de trabajo para la etapa 2 del ensayo GRG en el concentrador KNELSON

Tabla 2.4. Condiciones de operación para etapa 2 de ensayo GRG

Etapas 2	
Caudal de agua (L/min)	3.5
Granulometría (μm)	<75 (d_{50})
Alimentación por lote (kg)	1
Porcentaje en sólidos (%)	40

En la etapa 2 se alimentó el material aluvial por lotes y en forma de pulpa el 40% en sólidos, con el objetivo de evitar la saturación del cono rotatorio. Se obtuvieron muestras de concentrado y muestras de relave representativo.

2.2.3 Tercera etapa de ensayo GRG

El relave de la segunda etapa se llevó a molienda para alcanzar un tamaño de partícula tenga un d_{80} bajo los 75 μm . El tiempo de molienda requerido fue de 31 minutos, acorde a la linealización presentada en la Figura 2.6, por lo que se añadieron 8 minutos más de molienda al material. Se empleó la balanza Marcy para obtener pulpas de 62,5% de sólidos para molienda y 40% sólidos para alimentar la tercera etapa del ensayo GRG. Se repitieron las condiciones de molienda de barras de la etapa 2, la Tabla 2.5 presenta las condiciones de operación para la etapa 3 del ensayo GRG.

Tabla 2.4. Condiciones de operación para etapa 3 de ensayo GRG

Etapas 3	
Caudal de agua (L/min)	2.5
Granulometría (μm)	<75 (d_{80})
Alimentación por lote (kg)	1
Porcentaje en sólidos (%)	40

2.3 Análisis de oro recuperado

Del ensayo GRG se obtuvieron muestras de cada etapa de material concentrado y muestras representativas de los relaves. Las muestras fueron llevadas a ensayo al fuego y absorción atómica para determinar la cantidad de oro presente en las mismas.

Para los siguientes procesos, se necesitó homogeneizar las muestras de cada etapa por separado, se aplicó la técnica de manto, que consiste en una técnica para la homogeneización de la muestra, y para la separación de muestra representativa se empleó el divisor de rifles tipo Jones, este aparato se emplea para dividir una muestra seca y de granulometría menor a 15 mm en dos partes iguales, el divisor Jones consiste una serie de canales con una inclinación de 60°, colocados en lados opuestos, se colocan entre 12 a 20 canales. El divisor cuenta con la entrada para la muestra en la parte superior, al tener la división de muestra, una parte se descarta y la otra se emplea para análisis. (De La Torre, 2019) La Figura 2.8 presenta al divisor Jones.

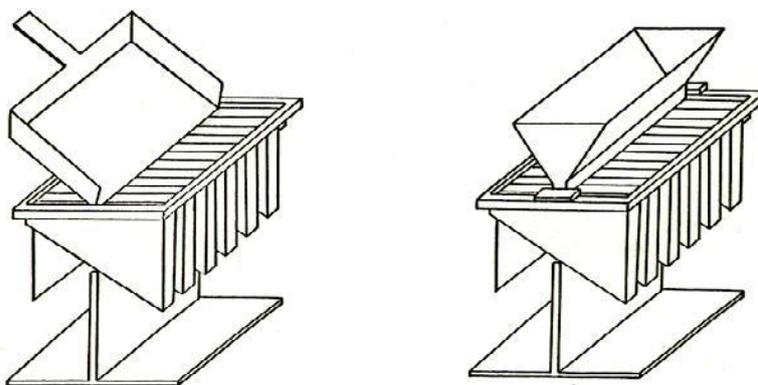


Figura 2.8. Divisor de rifles tipo Jones (De La Torre, 2019)

Se separaron 500 g de cada muestra de las etapas del ensayo GRG, las muestras de concentrado y relave representativo de la etapa 1 se llevaron a pulverización, el proceso consiste en reducir el tamaño de partícula menor a las 75 μm , que se considera una pulverización fina.

2.3.1 Ensayo al fuego

El ensayo al fuego es una de las técnicas más empleadas y de alta precisión para determinar el contenido de oro en minerales o aleaciones. En el ensayo al fuego, se busca la fundición del mineral junto con el metal que está contenido, se aprovecha la diferencia de densidad entre el metal y los compuestos de la ganga, generalmente sulfatos y otros elementos que forman parte del ensayo al fuego. (Battaini et al., 2013) En el ensayo al

fuego, la diferencia de la densidad de los elementos crea fases, la fase escoria es la de menor densidad y se compone de silicatos y boratos y su función es retener a los óxidos y otras impurezas, la fase mata contiene sulfuros de los metales como Fe y Cu, la fase Speiss contiene arseniuros, antimoniuros y metales como Fe, Co y Ni y la última fase es la metálica que contiene Pb, Ag y Au. (Iza, 2011)

La carga fundente es la mezcla de varios compuestos que desempeñan diferentes papeles en la fundición; la sílice disuelve óxidos metálicos y evita la corrosión del crisol, el Bórax baja los puntos de fusión de las escorias, el Na_2CO_3 disminuye la temperatura de fusión de la sílice, en presencia de PbO facilita la formación de sulfatos y hace de la colada de fundición menos viscosa, el PbO se encarga de recolectar a los metales (Oro, platino y plata), el carbono reduce al PbO en Pb, el AgNO_3 se coloca una manipulación del doré más sencilla, pero no forma parte de la carga fundente. (Iza, 2011)

La fundición del material se coloca en lingoteras para su enfriamiento, el siguiente paso es la copelación de la fase metálica, el recipiente o copela está hecho de diatomita y cenizas de hueso, la copela oxida todo metal que no sea considerado noble, en este caso, retiene al plomo, de la copelación se obtiene el doré, que se compone de oro y plata. El doré se forma por la fundición de los metales preciosos presentes en el régulo y la separación del plomo. (Iza, 2011)

La Tabla 2.5 presenta las cantidades de compuestos de la carga fundente que se empleó para la fundición del material aluvial del Río Nambija, la carga fundente se realizó en función de 30 g de material aluvial.

Tabla 2.5. Carga fundente para 30 g de material

Carga fundente	
Compuesto	Cantidad (g)
Na_2CO_3	20
Bórax	30
KNO_3	0,2
PbO	45
Sílice	7
Carbono	4

Se agregó 1 mL de AgNO_3 para una manipulación y encuartamiento más fácil del doré.

El tiempo de fundición de la muestra fue de 45 a 50 minutos a una temperatura aproximada de 950°C, la copelación se realizó durante 40 minutos a 950 °C en una mufla.

La Figura 2.9 presenta el horno de fundición en funcionamiento, la Figura 2.10 el régulo que se obtuvo y la Figura 2.11 la etapa de copelación.



Figura 2.9. Etapa de fundición



Figura 2.10. Régulo



Figura 2.11. Etapa de copelación

2.3.2 Absorción atómica

La absorción atómica (AA) es una técnica de detección de metales en su forma elemental, se basa en la ley de Lambert-Beer, por lo que la absorción de luz a una longitud de onda determinada permite conocer el elemento y su concentración. (Walsh, 1955) En el componente, se requirió de absorción atómica una vez se ha obtenido el doré de cada muestra, se disolvió la plata presente en el doré con una mezcla 1 mL de HNO_3 y agua en relación 1:1 en un baño María. Para eliminar la plata de la muestra se realizó un lavado de la solución que contiene la plata disuelta. La disolución del oro se realizó con 3mL de agua regia, que es la mezcla entre HNO_3 y HCl en una proporción de 1:3; se aforó la muestra a 10 mL y se envió a AA.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

3.1.1 Resultados de FRX y DRX

La Tabla 3.1 presenta los resultados del análisis FRX y la Tabla 3.2 los resultados del análisis DRX

Tabla 3.1. Resultados de análisis FRX

Elemento	Contenido (%)
Na	2,18
Mg	0,67
Al	7,59
Si	27,04
P	0,05
S	0,03
K	2,08
Ca	2,61
Ti	0,35
Mn	0,34
Fe	4,82

Tabla 3.2. Resultados de análisis DRX

Mineral	Fórmula	Contenido (%)
Plagioclasas	$(\text{Na,Ca})\text{Al}(\text{Si,Al})\text{Si}_2\text{O}_8$	54
Cuarzo	SiO_2	18
Clinocloro	$(\text{Mg,Fe})_5\text{Al}(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	15
Caolinita	$\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$	5
Moscovita	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	5
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	2
Cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	1

El elemento que se encontró en mayor contenido fue Si con 27,04%; además, por el análisis DRX en la composición mineral se presentaron dos tipos de silicatos (Plagioclasas y

clinocloro) y cuarzo como los más abundantes. No se presentaron elementos guía, es decir, elementos que se encuentran comúnmente en depósitos de oro como arsénico, azufre, cadmio, entre otros. La presencia de cuarzo es un indicativo que el mineral contiene oro, es común encontrar este tipo de mineral en la cercanía de ríos, este tipo de formaciones provocan la aparición de oro conocido como placer. (Stüwe, 1998)

3.1.2 Resultados del ensayo GRG etapa 1

La Tabla 3.3 contiene las cantidades de concentrado, relave representativo y relave restante que se obtuvieron en la etapa 1

Tabla 3.3. Pesos de concentrado , relave representativo y relave de etapa 1

Etapa 1 Alimentación [kg]:		20
Concentrado [kg]	Relave representativo [kg]	Relave [kg]
0,45	3,17	16,38

En la primera etapa se usaron dos métodos para la alimentación, al 100% en sólidos y al 40% en sólidos; Greenwood (2013), demostró que es posible operar con una alimentación de material seca en un concentrador si se cumplen con los criterios de tamaño de partícula y se opera a una fuerza de al menos 60G; también, se menciona que es preferible trabajar con material en forma de pulpa para facilitar la entrada de flujo y evitar compactación.

La Tabla 3.4 presenta los resultados del análisis de absorción atómica de concentrado y relave de la etapa 1

Tabla 3.5. Resultados de AA de concentrado y relave de etapa 1

	Concentrado [g Au/t]	Relave [g Au/t]
Etapa 1	0,91	0,03

Se realizó un análisis de cabeza del mineral antes de ingresar a la primera etapa del ensayo GRG, se reportó una concentración de 0,14 gramos de Au por tonelada de mineral. Según los resultados de absorción atómica en la etapa 1, el concentrado registró un aumento de concentración, con 0,91 gramos de Au por tonelada de mineral, mientras que en el relave la concentración fue de 0,03 gramos de Au por tonelada de mineral. La Tabla 3.6 indica la cantidad en masa de oro en el concentrado y relave según la concentración que se obtuvo

por absorción atómica, además, se presenta el porcentaje de recuperación de oro en la etapa 1 según la cantidad de masa.

Tabla 3.6. Cantidad de oro recuperado en masa y porcentaje en etapa 1

	Oro en concentrado [mg]	Oro en relave [mg]	%Au concentrado	%Au relave
Etapa 1	0,41	0,65	38,55	61,45

En la etapa 1, se reportaron 1,06 mg de Au, se recuperó el 38,55%, la ley recalculada según los resultados de la etapa 1 fue de 0,053 g de oro por tonelada de mineral.

3.1.3 Resultados del ensayo GRG etapa 2

La alimentación para la etapa 2 del ensayo GRG fue de 12,98 kg; 3,4 kg del relave de la primera etapa no fueron utilizados. La alimentación se realizó con un porcentaje de sólidos de 40% y con un tamaño de partícula que cumplió un d_{50} menor a 75 μm . La Tabla 3.7 presenta las cantidades en masa de concentrado, relave representativo y relave restante de la etapa 2, la Tabla 3.8 indica los resultados de absorción atómica para el concentrado y relave de la etapa 2

Tabla 3.7. Pesos de concentrado , relave representativo y relave de etapa 2

Etapa 2 Alimentación [kg]:		12,98
Concentrado [kg]	Relave representativo [kg]	Relave [kg]
0,20	1,30	11,49

Tabla 3.8. Resultados de AA de concentrado y relave de etapa 2

	Concentrado [g Au/t]	Relave [g Au/t]
Etapa 2	4,35	0,10

La reducción de tamaño del material aluvial provocó la liberación del oro ocluido en la ganga y uniformidad en el tamaño de partícula de la ganga respecto al oro fino; el cuarzo

que forma parte del material aluvial puede ser el mineral que contiene al oro; el tamaño de las partículas de oro que se encuentran asociadas en cuarzo suele estar entre las 75 a 100 μm , lo que se considera como oro fino, existen casos en que el tamaño de partícula del oro es menor a 75 μm en el cuarzo, pero esto es más común en minerales como la pirita, en donde el tamaño del oro puede llegar hasta menos de 5 μm , se considera oro ultra fino. (Knight et al., 1999)

La Tabla 3.9 presenta la cantidad en masa de oro en el concentrado y relave según la concentración que se obtuvo por absorción atómica, y el porcentaje de recuperación de oro en la etapa 2 según la cantidad de masa.

Tabla 3.9. Cantidad de oro recuperado en masa y porcentaje en etapa 2

	Oro en concentrado [mg]	Oro en relave [mg]	%Au concentrado	%Au relave
Etapa 2	0,85	1,24	40,71	59,29

En la etapa 2 se reportó una cantidad de oro de 2,09 mg; la recuperación en el concentrado fue de 40,71%. Se reportó un incremento de oro entre el relave de la etapa 1 de 0,65 mg de oro a 2,09 mg de oro en toda la etapa 2; las posibles causas son la liberación de más partículas finas de oro en la segunda etapa por la reducción del tamaño, lo que provocó mayor dispersión del oro; además, para la determinación de la concentración de oro en los relaves únicamente se analizó una muestra representativa, se requiere de más ensayos de determinación de la concentración de oro o una mejor homogeneización en la toma de la muestra del relave para verificar la concentración de oro, por lo que la concentración del relave de la etapa 1 puede tener una concentración mayor a 0,03 g Au/t.

Los resultados de la etapa 2 en comparación con la etapa 1 mostraron una mejora en el porcentaje de recuperación y en la cantidad en masa de oro concentrado, la influencia de reducción del tamaño de partícula causó la liberación del oro encapsulado en el mineral aluvial; también, trabajar con el material aluvial a un porcentaje de sólidos del 40% ayudó a una mejor fluidización de las partículas en el interior del cono rotatorio.

3.1.4 Resultados del ensayo GRG etapa 3

La alimentación para la etapa 3 del ensayo GRG fue de 11,49 kg, la alimentación se realizó con un porcentaje de sólidos de 40% y con un tamaño de partícula que cumplió un d_{80}

menor a 75 μm . La Tabla 3.10 presenta las cantidades en masa de concentrado, relave representativo y relave restante de la etapa 3, la Tabla 3.11 indica los resultados de absorción atómica para el concentrado y relave de la etapa 3 y la Tabla 3.12 presenta la cantidad en masa de oro en el concentrado y relave según la concentración que se obtuvo por absorción atómica, y el porcentaje de recuperación de oro en la etapa 3 según la cantidad de masa.

Tabla 3.10. Pesos de concentrado , relave representativo y relave de etapa 3

Etapa 3 Alimentación [kg]:		11,49
Concentrado [kg]	Relave representativo [kg]	Relave [kg]
0,27	0,41	10,81

Tabla 3.11. Resultados de AA de concentrado y relave de etapa 3

	Concentrado [g Au/t]	Relave [g Au/t]
Etapa 3	0,36	0,12

Tabla 3.12. Cantidad de oro recuperado en masa y porcentaje en etapa 3

	Oro en concentrado [mg]	Oro en relave [mg]	%Au concentrado	%Au relave
Etapa 3	0,10	1,35	6,70	93,30

La cantidad de oro en masa de la etapa 3 fue de 1,44 mg, el concentrado en esta etapa tiene la menor concentración de oro con 0,36 g de Au por tonelada de mineral, además el porcentaje de recuperación fue el más bajo de las tres etapas con 6,70%. A pesar del bajo porcentaje de recuperación de la etapa 3, la concentración centrífuga es un método de recuperación de oro eficiente cuando el tamaño de partícula del metal de interés es menor a 75 μm . Las posibles causas del bajo porcentaje de recuperación se pueden dar por la posible recuperación de la mayor parte de oro liberado en la etapa 2, o una posible contaminación debido a reutilizar crisoles de ensayos anteriores en la etapa de ensayo al fuego del relave.

3.1.4. Recuperación global del ensayo GRG

La Tabla 3.13 presenta la cantidad de oro recuperado en cada etapa con su porcentaje de oro acumulado. La cantidad total de oro en el material aluvial sedimentado fue de 2.7 mg de oro.

Tabla 3.13. Cantidad de oro recuperado en cada etapa con su porcentaje de oro acumulado

Etapa	Oro recuperado acumulado [mg]	% Recuperación acumulada
1	0.41	15.12%
1+2	1.26	46.62%
1+2+3	1.36	50.19%

3.1.5 Comparación del concentrador KNELSON con equipos de concentración gravimétrica (Concentrador Zetas)

El concentrador tipo Zetas se emplea en la pequeña minería y artesanal por ser un equipo que no requiere de un sistema auxiliar como motor. (Acosta Fiallos & Feijoo Loayza, 2020) En el estudio de Veiga & Gunson (2020) se evaluaron diferentes equipos para la recuperación de oro aluvial, entre ellos, el concentrador tipo Zetas; la evaluación consistió en recopilar información de los porcentajes de recuperación de oro en los equipos que se emplean comúnmente en la minería artesanal, se procesó en todos los equipos un mineral aluvial de una de las zonas que realizan minería artesanal en Colombia, la Figura 3.1 presenta el concentrador tipo Zeta usado en el estudio y la Figura 3.2 muestra una modificación de la mesa vibratoria Wilfley, este tipo de mesas consisten en una superficie inclinada con canales formados por rifles que sobresalen de su superficie, trabajan con un flujo de agua que realiza el empuje de las partículas livianas en dirección del flujo, y los rifles se encargan de retener las partículas más pesadas, la mesa Wilfley trabaja con movimiento oscilatorio para mover a las partículas más pesadas al otro lado de la mesa. La mesa Wilfley modificada tiene un mecanismo de movimiento que consiste en un pedal conectado a una rueda que provoca el movimiento oscilatorio de la mesa, con el fin de ahorrar energía.



Figura 3.1. Concentrador tipo Zeta para la recuperación de oro aluvial en Zaragoza, Colombia. (Veiga & Gunson, 2020)

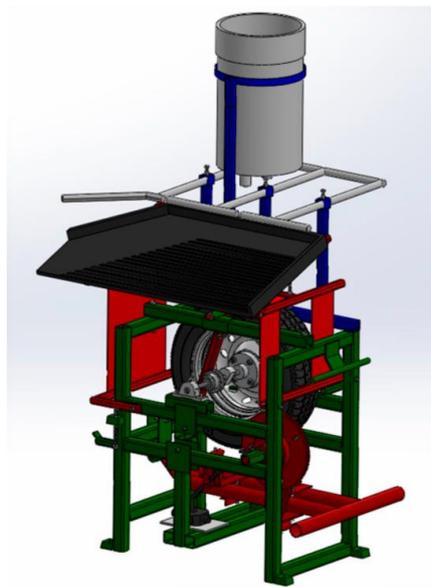


Figura 3.2. Mesa vibratoria modificada por CICAN.(Veiga & Gunson, 2020)

La Figura 3.3 presenta la distribución de grano de partícula del material para la evaluación, como también la distribución de oro según el tamaño y la concentración de oro, el oro presente en el material es de tipo coluvial (parcialmente liberado) y también existe oro aluvial (completamente liberado); la mayor distribución de oro se encuentra en partículas con tamaño de 601 μm con 26% de la distribución y 58 μm con 20% de la distribución; las partículas de 601 μm contienen la mayor concentración de oro con casi 5,5 g/t.

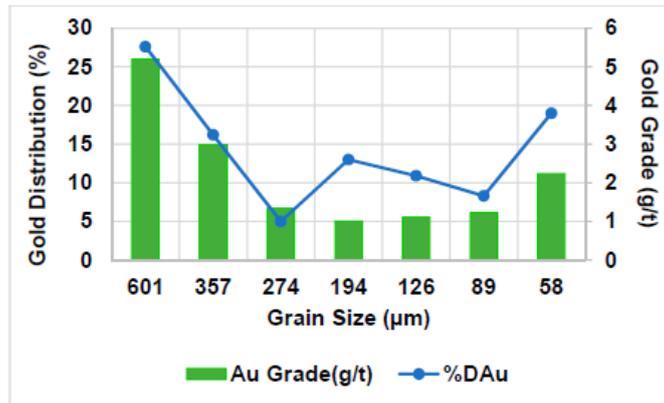


Figura 3.3. Distribución del tamaño de partícula para muestra de evaluación. (Veiga & Gunson, 2020)

La Figura 3.4 muestra los resultados de recuperación de oro y la ley del concentrado en cada equipo, el objetivo de la gráfica muestra dos campos para determinar su eficiencia, el oro que puede recuperar de la muestra alimentada y la separación del oro de su ganga para obtener un material con la mayor concentración de oro.

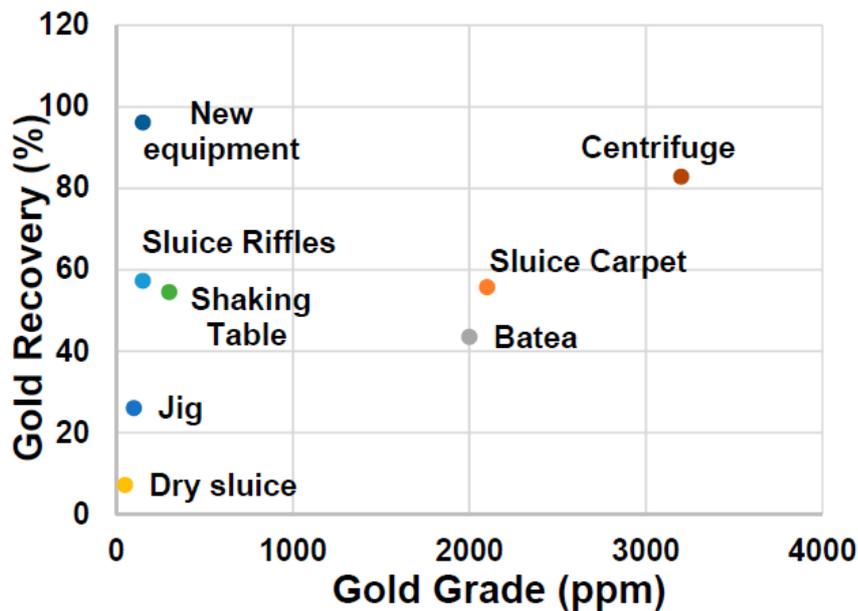


Figura 3.4. Resultados de recuperación de oro y ley en el concentrado de cada equipo. (Veiga & Gunson, 2020)

En todos los casos a excepción del canal en seco (Dry sluice), se trabajó con un flujo de agua como medio para la fluidización de partículas en cada equipo. La concentración gravimétrica en los concentradores Zeta, que entran en la categoría de sluice Riffles por su diseño y principio de separación similar, ya que el grado de inclinación varía entre 6 a 30 °, también dependen únicamente de la fuerza de gravedad (1G) y la diferencia de las

densidades entre oro y ganga, aunque se recuperó más del 50%, la ley de oro en el concentrado no superó los 100 ppm, el aumento en la concentración se dio por el arrastre de las partículas de menor densidad y bajo tamaño de partícula por parte del agua. Los resultados del concentrador centrífugo resaltan la importancia de trabajar con una fuerza centrífuga 60 veces mayor a la fuerza de gravedad, a esas condiciones la diferencia de densidades entre oro y ganga es más favorable, además, por uso de concentradores centrífugos se obtuvo el mayor grado de concentrado, se superaron los 3000 ppm.

La evaluación de concentración de oro en el estudio de Acosta & Feijoo (2020) reportó que la concentración en Zetas es ineficiente, al incrementar el flujo de alimentación afecta a la recuperación de oro grueso, además que el oro fino también se pierde en gran cantidad; por ejemplo, se evaluó la operación con 174 m³/h, la pérdida de oro grueso fue de más del 95%. El menor flujo de operación fue de 84 m³/h, registró más del 95% de oro fino en la descarga, por lo que obtuvieron una baja eficiencia de recuperación de oro ya que la mayor parte de oro se encontraba en los finos. El estudio menciona la importancia de emplear concentradores centrífugos como complemento al uso de Zetas, ya que, en cuestiones operacionales, no se realizaron balances de masa para determinar la recuperación del oro, por lo que el análisis de eficiencia del concentrador Zeta no es confiable.

3.2 Conclusiones

Los porcentajes de oro recuperado en cada etapa fueron de 38,55% en la etapa 1, 40,71% en la etapa 2 y 6,70% en la etapa 3. La etapa 2 obtuvo el mayor porcentaje de recuperación de oro después de la reducción del tamaño de partícula del mineral aluvial; del balance global del ensayo se recuperaron 1.36 mg de oro de los 2.7 mg de oro del material aluvial sedimentado, es decir, se obtuvo un porcentaje de recuperación global del 50.19%.

El rango de tamaño de partícula para una recuperación óptima en la concentración centrífuga con el equipo KNELSON fue entre 75 a 100 µm; el equipo de concentración gravimétrica Zeta puede ser un complemento para la concentración de oro grueso, y sus relaves pueden ingresar al concentrador KNELSON para una mejor recuperación de oro.

3.3 Recomendaciones

En el ensayo GRG se recomienda trabajar en todas las etapas con un flujo igual o menor a 1000 g/min para evitar la saturación del cono rotatorio; además, se sugiere que el porcentaje de sólidos en la pulpa de material aluvial sea del 40%.

En la etapa de ensayo al fuego, la reutilización de crisoles puede causar contaminación en las muestras por posibles partículas de metales (en este caso, oro) y afectar los resultados de absorción atómica. Se recomienda emplear crisoles nuevos para cada muestra, sin importar si son de la misma etapa.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Fiallos, F., & Feijoo Loayza, C. (2020). RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA UTILIZANDO CONCENTRADORES TIPO Z EN EL DISTRITO MINERO ZAMORA-ECUADOR. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(2), 42–49. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i2.2283>
- Ammirati, L., Mondillo, N., Rodas, R. A., Sellers, C., & di Martire, D. (2020). Monitoring Land Surface Deformation Associated with Gold Artisanal Mining in the Zaruma City (Ecuador). *Remote Sensing*, 12(13), 2135. <https://doi.org/10.3390/rs12132135>
- Battaini, P., Bemporad, E., & de Felicis, D. (2013). The fire assay reloaded. *Gold Bulletin*. <https://doi.org/10.1007/s13404-013-0101-1>
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. gabriela, & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Carrillo, G., & Astudillo, A. (2011). Evaluación de las emisiones de vapor mercurial en procesos de amalgamado artesanal: caso Cantón Ponce Enríquez, Provincia del Azuay. *MASKANA*, 2(2), 71–81. <https://doi.org/10.18537/mskn.02.02.06>
- Coulter, T., & Subasinghe, G. K. N. (2005). A mechanistic approach to modelling Knelson concentrators. *Minerals Engineering*, 18(1), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.035>
- de la Torre, E. (2019). *Pedrito aprende a ser Ingeniero OPERACIONES UNITARIAS BÁSICAS: Apuntes de clase* (3rd ed., Vol. 1).
- Dominy, S. C. (2014). Effects of sample mass on gravity recoverable gold test results in low-grade ores. *Applied Earth Science*, 123(4), 234–242. <https://doi.org/10.1179/1743275814Y.0000000061>
- Garduño, S. (2002). Enfoques metodológicos en la investigación educativa. *Investigación Administrativa*.
- Greenwood, M., Langlois, R., & Waters, K. E. (2013). The potential for dry processing using a Knelson Concentrator. *Minerals Engineering*, 45, 44–46. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.01.014>
- Grewal, I., & Kleek, M. van. (2009). *GRAVITY RECOVERY OF GOLD FROM WITHIN GRINDING CIRCUITS*.
- Hayes, D. (2018). *Knelson Concentrator*. 911 Metallurgist. <https://www.911metallurgist.com/author/michaud-david-2/>
- Iza, M. (2011). *Estudio para el mejoramiento de la fusión de calcinas auríferas con el uso de carbonato de calcio en la carga fundente*. Escuela Politécnica Nacional.
- Knight, J. B., Morison, S. R., & Mortensen, J. K. (1999). The relationship between placer gold particle shape, rimming, and distance of fluvial transport as exemplified by gold from the Klondike District, Yukon Territory, Canada. *Economic Geology*, 94(5), 635–648. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.5.635>

- Kwon, S., Park, S., Kim, S., Joe, A., Song, Y., Park, P., & Park, J. (2016). Separation of Tantalum from Electronic Components on Laptop Printed Circuit Board Assembly. *Journal of the Korean Institute of Resources Recycling*, 25(1), 24–30. <https://doi.org/10.7844/kirr.2016.25.1.24>
- Laplante, A. R., Woodcock, F., & Noaparast, M. (1995). Predicting gravity separation gold recoveries. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 12(2), 74–79. <https://doi.org/10.1007/BF03403081>
- Marsden John. (2006). *The chemistry of gold extraction* (2nd ed., Vol. 2). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Martinez, G., Restrepo-Baena, O. J., & Veiga, M. M. (2021). The myth of gravity concentration to eliminate mercury use in artisanal gold mining. *The Extractive Industries and Society*, 8(1), 477–485. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.01.002>
- Potts, P. J., & Webb, P. C. (1992). X-ray fluorescence spectrometry. *Journal of Geochemical Exploration*, 44(1–3), 251–296. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90052-A](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90052-A)
- Sakuhuni, G., Altun, N. E., Klein, B., & Tong, L. (2016). A novel laboratory procedure for predicting continuous centrifugal gravity concentration applications: The gravity release analysis. *International Journal of Mineral Processing*, 154, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2016.07.004>
- Silva, M. (1986). *Placer gold recovery methods* (Vol. 87). Division of Mines and Geology.
- Stüwe, K. (1998). Tectonic constraints on the timing relationships of metamorphism, fluid production and gold-bearing quartz vein emplacement. *Ore Geology Reviews*, 13(1–5), 219–228. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(97\)00019-X](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(97)00019-X)
- UNEP. (2005). *Instrumental para la identificación y cuantificación de liberaciones de mercurio*.
- Valderrama, L., Chamorro, J., Olgún, D., Rivera, J., & Oyarce, J. (2012). *AMALGAMACIÓN DE CONCENTRADO DE ORO OBTENIDO EN CONCENTRADOR KNELSON*.
- Veiga, M. M., & Gunson, A. J. (2020). Gravity Concentration in Artisanal Gold Mining. *Minerals*, 10(11), 1026. <https://doi.org/10.3390/min10111026>
- Veiga, M. M., Masson, P., Perron, D., Laflamme, A.-C., Gagnon, R., Jimenez, G., & Marshall, B. G. (2018). An affordable solution for micro-miners in Colombia to process gold ores without mercury. *Journal of Cleaner Production*, 205, 995–1005. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.039>
- Veintimilla, J. (2014). *Caracterización geológica y mineralógica del sector El Tierrero, distrito minero Nambija, provincia de Zamora Chinchipe, Ecuador*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Venegas, G., & Yépez, D. (2022). *Efectos tóxicos en la salud relacionados con la exposición a mercurio debido a la actividad minera en Ecuador*. Universidad Central del Ecuador.
- Walsh, A. (1955). The application of atomic absorption spectra to chemical analysis. *Spectrochimica Acta*, 7, 108–117. [https://doi.org/10.1016/0371-1951\(55\)80013-6](https://doi.org/10.1016/0371-1951(55)80013-6)

5 ANEXOS

ANEXO I

Ensayos de molienda

Tabla A1. Ensayos de reducción de partícula en molino de bolas de material aluvial

Peso					
Abertura (µm)	Malla #	Abertura promedio (µm)	Coluvial Inferior 10 min	Coluvial inferior 20 min	Coluvial inferior 30 min
2000		2000	0	0	0
600	-10, +30	1300	0,6	0	0
250	-30, +60	425	23,6	0,3	0,2
150	-60, +100	200	205,3	28,6	4,4
106	-100, +140	128	161,6	80,1	23,2
75	-140, +200	90,5	167,6	199,7	121,4
53	-200, +270	64	111,2	170,5	174,4
38	-270, +400	45,5	72,4	114,4	143,1
0	-.400	19	225,7	406,4	533,3
		TOTAL	968	1000	1000
Retenido					
Abertura (µm)	Malla #	Abertura promedio (µm)	% Retenido CI 10 min	% Retenido CI 20 min	% Retenido CI 30 min
2000		2000	0,00%	0,00%	0,00%
600	-10, +30	1300	0,06%	0,00%	0,00%
250	-30, +60	425	2,44%	0,03%	0,02%
150	-60, +100	200	21,21%	2,86%	0,44%
106	-100, +140	128	16,69%	8,01%	2,32%
75	-140, +200	90,5	17,31%	19,97%	12,14%
53	-200, +270	64	11,49%	17,05%	17,44%
38	-270, +400	45,5	7,48%	11,44%	14,31%
0	-400	19	23,32%	40,64%	53,33%
		TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%
Retenido Acumulado					

Abertura (µm)	Malla #	Abertura promedio (µm)	CI 10 min	CI 20 min	CI 30 min
2000		2000	0,00%	0,00%	0,00%
600	-10, +30	1300	0,06%	0,00%	0,00%
250	-30, +60	425	2,50%	0,03%	0,02%
150	-60, +100	200	23,71%	2,89%	0,46%
106	-100, +140	128	40,40%	10,90%	2,78%
75	-140, +200	90,5	57,72%	30,87%	14,92%
53	-200, +270	64	69,20%	47,92%	32,36%
38	-270, +400	45,5	76,68%	59,36%	46,67%
0	-400	19	100,00%	100,00%	100,00%
Pasado acumulado					
Abertura (µm)	Malla #	Abertura promedio (µm)	CI 10 min	CI 20 min	CI 30 min
2000		2000	100,00%	100,00%	100,00%
600	-10, +30	1300	99,94%	100,00%	100,00%
250	-30, +60	425	97,50%	99,97%	99,98%
150	-60, +100	200	76,29%	97,11%	99,54%
106	-100, +140	128	59,60%	89,10%	97,22%
75	-140, +200	90,5	42,28%	69,13%	85,08%
53	-200, +270	64	30,80%	52,08%	67,64%
38	-270, +400	45,5	23,32%	40,64%	53,33%
0	-400	19	0,00%	0,00%	0,00%
		d80	239,34	110,91	82,78
		d50	118,04	68,54	47,66