



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA Y MATERIALES

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN METALURGIA Y CIENCIAS DE LOS MATERIALES

**CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y FÍSICA DE UN MINERAL AURÍFERO DE LA
REGIÓN DE NOCUPÉTARO, MICHOACÁN Y DISEÑO DE SU PROCESO DE
BENEFICIO**

Tesis que para obtener el grado de
Maestro en metalurgia y ciencias de los materiales presenta:

ING. ANAYELI AVELLANEDA TORRES.

Director de tesis:
DR. RAMIRO ESCUDERO GARCÍA.

Morelia, Michoacán. Febrero de 2018.

Agradecimientos

Gracias a mi asesor, el Dr. Ramiro Escudero García por su conocimiento, apoyo, paciencia y dedicación brindados en el desarrollo de este proyecto.

A mis sinodales: Dra. Diana Cholico, Dr. Egberto Bedolla, Dr. Ricardo Morales, Dr. Feng Rao y Dra. Noemí Ortiz por el tiempo dedicado en la revisión de mi tesis y por toda la retroalimentación aportada.

A los técnicos por su disposición de servicio, en especial a la Ing. Ma. Remedios Cisneros, gracias por tu tiempo, amabilidad y amistad.

A mi esposo M.C. Abraham Ortiz por su paciencia, motivación, comprensión y apoyo durante esta etapa de mi vida. Gracias por estar conmigo en esta gran experiencia, siempre impulsándome a seguir adelante.

Gracias a mis padres, por creer en mí y por su apoyo incondicional.

A mis hermanos, que a pesar de estar lejos siempre encuentran la manera de hacerme sentir que los tengo cerca y no me dejan sola.

A mis amigos y compañeros, por todos los momentos vividos a lo largo de esta etapa.

Por último, quiero agradecer a todas las personas que, de una u otra manera, han formado parte de mi vida profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.	1
1.1 Justificación.	2
1.2 Objetivos del proyecto de investigación	3
<i>1.2.1 Objetivo General:</i>	<i>3</i>
<i>1.2.2 Objetivos Particulares:</i>	<i>3</i>
1.3 Hipótesis.	3
1.4 Metas científicas	3
CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.	4
2.1 Oro.....	4
2.2 Yacimientos de oro.	4
2.3 Situación de la minería en México.	6
2.4 Situación de la minería en Michoacán.....	9
2.5 Producción de oro y plata en la región de Tierra Caliente en el estado de Michoacán.	10
2.6 Caracterización física y química de un mineral.	11
<i>2.6.1 Difracción de rayos X.</i>	<i>12</i>
<i>2.6.2 Espectroscopia de absorción atómica.....</i>	<i>13</i>
<i>2.6.3 Microscopía Electrónica de Barrido.....</i>	<i>15</i>
<i>2.6.4 Determinación de tamaño de partículas.</i>	<i>16</i>
<i>2.6.5 Densidad del mineral.</i>	<i>16</i>
<i>2.6.6 Susceptibilidad magnética.....</i>	<i>17</i>
2.7 Liberación de especies minerales.	19
2.8 Diseño de las etapas unitarias para el procesamiento del mineral.	20
2.9 Procesos metalúrgicos para el beneficio de minerales auríferos.....	21
<i>2.9.1 Métodos gravimétricos.</i>	<i>21</i>
<i>2.9.2 Beneficio de mineral aurífero por medio de un elutriador.</i>	<i>24</i>
<i>2.9.3 Concentración de mineral aurífero con equipo Falcon.</i>	<i>25</i>
<i>2.9.4 Concentrador iCON.</i>	<i>29</i>
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.	32

3.1 Recolección de muestra.....	32
3.2 Trituración y molienda.	34
3.3 Caracterización química y física del mineral de cabeza.	35
3.3.1 <i>Análisis químico cualitativo.</i>	35
3.3.2 <i>Análisis químico cuantitativo.</i>	36
3.3.3 <i>Distribución de tamaño de partícula.....</i>	37
3.3.4 <i>Determinación de la densidad.....</i>	37
3.3.5 <i>Susceptibilidad magnética.....</i>	38
3.4 Reducción de tamaño de partícula a 2 y 6 horas de molienda.	39
3.5 Caracterización física y química de muestras por rango de tamaños.	40
3.5.1 <i>Análisis químico cualitativo.</i>	40
3.5.2 <i>Análisis químico cuantitativo.</i>	40
3.5.3 <i>Densidad</i>	40
3.5.4 <i>Distribución de tamaño de partícula.....</i>	41
3.6 Propuesta del diseño de proceso de beneficio del mineral.....	41
3.7 Beneficio del mineral por elutriación.	41
3.7.1 <i>Caracterización del concentrado obtenido por elutriación.</i>	43
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
4.1 Mineral de cabeza.....	44
4.2 Resultados de la caracterización química y física del mineral de cabeza.	44
4.2.1 <i>Análisis químico cualitativo por difracción de rayos X (DRX).....</i>	44
4.2.2 <i>Análisis químico cualitativo por microscopía electrónica de barrido (MEB).</i>	45
4.2.3 <i>Análisis químico cuantitativo.</i>	48
4.2.4 <i>Densidad.</i>	48
4.2.5 <i>Susceptibilidad magnética.....</i>	49
4.2.6 <i>Distribución de tamaño de partícula.....</i>	51
4.3 Caracterización química y física del mineral por tiempo de molienda.	54
4.3.1 <i>Análisis químico cualitativo para 2 horas de molienda.</i>	54
4.3.2 <i>Densidad del tamaño de partícula grueso, medio y fino para 2 horas de molienda.....</i>	59
4.3.3 <i>Densidad del tamaño de partícula grueso, medio y fino para 6 horas de molienda.....</i>	59
4.3.4 <i>Concentración de Au del tamaño de partícula grueso, medio y fino a 2 horas de molienda.....</i>	63
4.3.5 <i>Concentración de Au del tamaño de partícula grueso, medio y fino a 6 horas de molienda.....</i>	64

4.4 Propuesta del diseño de beneficio del mineral.....	67
<i>4.4.1 Beneficio del mineral por elutriación.</i>	<i>68</i>
4.5 Cálculo de costos de operación.....	72
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	82
Recomendaciones.....	84
Referencias bibliográficas.....	85
Anexo I.....	88

INDICE DE FIGURAS

Capítulo II

Figura 2. 1 Oro nativo. 1612 gramos, Eureka mine, California.	5
Figura 2. 2 Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2015 (213 462 millones de pesos) [8].	6
Figura 2. 3 Participación de México en la producción minera mundial en 2015 [9].	7
Figura 2. 4 Volumen y valor de la producción minero-metalúrgica, 2014-2015 [9].	8
Figura 2. 5 Volumen de la producción minera estatal 2011-2015 (toneladas) [12].	9
Figura 2. 6 Valor de la producción minera estatal 2011-2015 (pesos corrientes) [12]	10
Figura 2. 7 Producción de las minas activas en la región de Tierra Caliente [11].	11
Figura 2. 8 Muestra el acomodo para las mediciones de absorción. Observe que la fuente de radiación de la longitud de onda seleccionada se envía desde la fuente a través de la muestra, y la radiación transmitida se mide por medio de la unidad detector-procesador de la señal y sistema de lectura [19].	15
Figura 2. 9 Esquema del concepto de liberación de especies [27].	20
Figura 2. 10 Mesa de concentración gravimétrica (Wifley).	23
Figura 2. 11 Configuración del rotor del concentrador Falcon [35].	26
Figura 2. 12 Principio de separación del concentrador Falcon.	27
Figura 2. 13 Diagrama del concentrador iCON [37].	29

Capítulo III

Figura 3. 1 Desarrollo experimental. Primera parte de la experimentación; Caracterización del mineral de cabeza.	32
Figura 3. 2 Mapa de la zona donde se encuentra el yacimiento mineral.	34
Figura 3. 3 Esquema representativo de la operación de cuarteado de las muestras minerales.	34
Figura 3. 4 Segunda etapa del desarrollo experimental. Beneficio del mineral aurífero.	39
Figura 3. 5 Elutriador vertical utilizado para la concentración de las muestras minerales estudiadas.	42

Capítulo IV

Figura 4. 1 Difractograma comparativo del mineral de cabeza para las muestras 106, 107, 108 y 109.	45
Figura 4. 2 Mapeos realizados al mineral de cabeza por microscopía electrónica de barrido. a) Muestras 106, b) Muestra 107, c) Muestras 108 y d) Muestra 109.	47
Figura 4. 3 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 106.	51
Figura 4. 4 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 107.	52

Figura 4. 5 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 108.....	53
Figura 4. 6 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 109.....	53
Figura 4. 7 Difractograma de la muestra 106 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.....	55
Figura 4. 8 Difractograma de la muestra 107 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.....	56
Figura 4. 9 Difractograma de la muestra 108 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.....	57
Figura 4. 10 Difractograma de la muestra 109 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.....	58
Figura 4. 11 Densidad calculada para las cuatro muestras estudiadas durante 2 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80}	59
Figura 4. 12 Densidad calculada para las cuatro muestras estudiadas durante 6 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80}	60
Figura 4. 13 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 106.	61
Figura 4. 14 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 107.	61
Figura 4. 15 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 108.	62
Figura 4. 16 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 109.	62
Figura 4. 17 Concentración de Au para las cuatro muestras analizadas a 2 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80}	63
Figura 4. 18 Concentración de Au para las cuatro muestras analizadas a 6 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80}	64
Figura 4. 19 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 106.	65
Figura 4. 20 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 107.	66
Figura 4. 21 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 108.	66
Figura 4. 22 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 109.	67

Figura 4. 23 Imagen representativa de distribución de los valores en las corrientes de alimentación, concentrado y desechos.....	70
Figura 4. 24 Porcentaje de recuperación en el concentrador.....	81

INDICE DE TABLAS

Capítulo II

Tabla 2. 1 Densidades de algunos minerales [24].	17
Tabla 2. 2 Susceptibilidad magnética de algunos minerales [25]	18

Capítulo III

Tabla 3. 1 Coordenadas de las muestras que fueron tomadas en cuatro diferentes puntos del yacimiento mineral. h significa la altitud geográfica del punto de acuerdo al GPS.	33
Tabla 3. 2 Variables utilizadas en el horno de microondas para la digestión de las muestras minerales.....	36

Capítulo IV

Tabla 4. 1 Elementos presentes en las cuatro muestras de mineral de cabeza.	46
Tabla 4. 2 Resultados para la cuantificación de Au por espectroscopia de absorción atómica.....	48
Tabla 4. 3 Densidad del mineral de cabeza.	49
Tabla 4. 4 Especies minerales contenidas en el mineral de estudio y sus respectivos valores de susceptibilidad magnética [25]......	50
Tabla 4. 5 d_{80} correspondiente a las cuatro muestras minerales analizadas.	54
Tabla 4. 6 Concentración de Au para muestra 106 pulverizada 1 hora en molino de bolas y concentrada con ayuda de un elutriador.	69
Tabla 4. 7 Costo de operación de equipos por horas trabajadas semanalmente.....	72
Tabla 4. 8 Pagos semanales de los empleados en la planta.....	72
Tabla 4. 9 Pago semanal por consumo de diesel.....	73
Tabla 4. 10 Pagos y costos semanales totales	73
Tabla 4. 11 Costo por barrenación, explosivos, diese y paridad peso-dólar.	74
Tabla 4. 12 Equivalencias de barrenación a toneladas.....	74
Tabla 4. 13 Cálculo de inversión total.....	76
Tabla 4. 14 Cálculo del punto de equilibrio	79

RESUMEN

El procesamiento de minerales inicia con la caracterización química y física de las rocas extraídas. Mediante la caracterización química se conoce la composición química del mineral y las fases mineralógicas presentes. La caracterización física por su parte se refiere a la medición o estimación de propiedades como densidad, forma, apariencia, entre otras. Cada yacimiento mineral, aún perteneciendo a un mismo tipo genérico debe ser procesado de manera particular debido a que la asociación mineralógica y composición química es diferente con respecto a otros yacimientos del mismo tipo. No puede entonces aplicarse un determinado proceso de beneficio a todos los yacimientos que contengan en esencia la misma especie considerada de valor.

En el presente trabajo se caracterizaron física y químicamente cuatro muestras minerales recolectadas de un yacimiento ubicado en la región de Nocupétaro, Michoacán, para proponer el mejor procedimiento de procesamiento y concentración de especies minerales de oro. El análisis químico cualitativo para identificar las fases mineralógicas presentes se realizó mediante la técnica de difracción de rayos X. El análisis químico cuantitativo (contenido de oro) se llevó a cabo por digestión ácida, seguida de la cuantificación del medio acuoso por espectroscopia de absorción atómica. Mediante la caracterización física se estimó la densidad de las muestras minerales, así como la distribución del tamaño de partícula resultante después de los diferentes tiempos de molienda seleccionados. En la mayoría de los casos se observó una relación directa entre la densidad de los polvos minerales y el contenido de oro, de tal manera que el contenido de oro aumenta con la densidad.

El resultado del estudio de liberación indica que el tamaño de partícula adecuado para la concentración de las especies de oro se encuentra entre 150 y 100 μm , en donde se presenta una concentración de Au que va de 8 a 15 g/Ton. Con la información anterior fue posible establecer el procedimiento adecuado de concentración de las especies auríferas, que en este caso es la concentración gravimétrica. Las pruebas de concentración a nivel laboratorio se realizaron empleando un elutriador vertical con inyección de aire.

Los resultados experimentales para la concentración de especies auríferas contenidas en las rocas minerales estudiadas por elutriación, alcanzaron concentraciones mayores a 28 g/ton, partiendo de 8.6 g/ton en el mineral de cabeza, lo que resulta en recuperaciones del 30%. Considerando el

porcentaje de recuperación alcanzado a nivel laboratorio, se requieren \$78,458.85 M.N. diarios para las operaciones de extracción en la planta, por lo tanto, el punto de equilibrio se establece en la necesidad de procesar al menos 81 toneladas por día.

PALABRAS CLAVE: Metalurgia extractiva, procesamiento de minerales, concentración gravimétrica, elutriación, mineral aurífero.

ABSTRACT

Mineral processing begins with the chemical and physical characterization of the extracted rocks. By means of the chemical characteristic, the chemical technique of the mineral and the mineralogical phases present are known. The physical characterization on the other hand refers to the measurement or estimation of properties such as density, shape, appearance, among others. Each mineral deposit, even belonging to the same generic type, must be processed in a particular way because the mineralogical association and the chemical composition are different with respect to other deposits of the same type. You can not add a certain benefit process to all deposits that essentially contain the same species considered to be of value.

In the present work, four mineral samples collected from a deposit located in the region of Nocupétaro, Michoacán, were physically and chemically characterized to propose the best processing and concentration of gold mineral species.

The qualitative chemical analysis to identify the mineralogical phases was presented by the X-ray diffraction technique. The quantitative chemical analysis was carried out by acid digestion, followed by the quantification of the aqueous medium by atomic absorption spectroscopy. By means of the physical characteristic, the density of the mineral samples is estimated, as well as the distribution of the particle size resulting from the different selected grinding times. In most cases, a direct relationship was observed between the density of the mineral powders and the gold content, such that the gold content increased with density.

The result of the release study is between 150 and 100 μm , where a concentration of 8 to 15 g/Ton is presented. With the above information it is possible to establish the proper procedure for concentrating the auriferous species, which in this case is the gravimetric concentration. Concentration tests at the laboratory level were performed using a vertical elutriator with air injection.

The experimental results for the concentration of auriferous species contained in the mineral rocks studied by elutriation, reaching greater 28 g/ton, starting from 8.6 g/ton in the head mineral, resulting in recoveries of 30%. Considering the percentage of recovery achieved at the laboratory level, \$78,458.85 M.N. for the operations of extraction in the plant, therefore, the point of balance is established in the need of at least 81 tons per day.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.

Por sus características físicas y químicas el oro es un elemento bastante utilizado en aplicaciones tecnológicas, así como en motivos de ornato. El oro se encuentra en la naturaleza en forma pura o nativa, diseminado (libre en tamaños micrométricos) y en solución asociado a otras especies minerales [1].

El precio del oro en el mercado es alto y esto justifica el hecho de que la extracción de minerales auríferos se realice de yacimientos que contienen hasta medio gramo por tonelada del metal precioso para su beneficio y obtención del metal base, en cuyos casos la factibilidad económica la establece la cantidad de masa mineral que debe extraerse y procesarse [1].

Se menciona en la literatura una serie de procedimientos para el procesamiento y beneficio de los minerales auríferos, cada ruta se establece dependiendo de los componentes minerales que acompañan al oro ya sea libre o en asociación química; este hecho, hace interesante la aplicación de las teorías involucradas en el procesamiento de minerales y marca la premisa de que ningún mineral, aun siendo del mismo tipo o que contiene el mismo metal base, puede ser procesado aplicando un mismo procedimiento; es más, es bien conocido que a pesar de diseñar una ruta de extracción y beneficio del mineral, el proceso en cuestión debe ser ajustado o modificado, debido al cambio químico del mineral en el mismo yacimiento [2].

El procesamiento de minerales a partir de la extracción del mismo, inicia con la caracterización química y física de las rocas extraídas. La caracterización química incluye la composición química del mineral y las fases mineralógicas presentes. La caracterización física por su parte se refiere a la estimación de la densidad, forma, apariencia, susceptibilidad magnética, entre otras.

El conocimiento de las características físicas y químicas de las rocas minerales permite establecer el procedimiento apropiado para concentrar o separar las especies minerales que se consideran de valor.

De la exploración al yacimiento mineral se obtiene una serie de muestras minerales para su caracterización. En el laboratorio se miden y estiman las propiedades físicas y químicas de las muestras recolectadas y se establece la propuesta de procesamiento del mineral. Con la

información anterior se llevan a cabo las pruebas experimentales en el laboratorio y después en la planta piloto, antes de aplicarse o ajustarse a un proceso industrial [3,4].

El estudio del mineral en cuestión inicia con el Estudio de Liberación. Después de triturar y moler las rocas extraídas, se establece el tamaño de partícula máximo en el que la especie aurífera o las partículas de oro están libres, al menos en el 70% del total de un peso determinado. Después de esto, conociendo la naturaleza química del mineral, se diseña el procedimiento de concentración de oro, ya sea mediante técnicas gravimétricas, flotación, lixiviación, fundición, o una combinación de ellas [4].

El presente trabajo de investigación incluye la caracterización de rocas minerales recolectadas de un yacimiento aurífero de la región de Nocupétaro, Michoacán, para establecer la factibilidad de su beneficio o concentración, mediante la propuesta de un procedimiento adecuado que resulte en la obtención de un concentrado de oro.

1.1 Justificación.

Los minerales, aun perteneciendo al mismo tipo (por ejemplo auríferos), difieren en cuanto a su asociación y composición química, a pesar incluso de hallarse en el mismo yacimiento. La diferencia en cuanto a su asociación química resulta en la presencia de diversas especies minerales, que observan diferentes propiedades físicas y químicas, que dificultan su separación. Este hecho indica que un procedimiento determinado para liberar y concentrar determinada especie mineral de valor contenida en una mena mineral, no puede ser aplicado a otra mena, a pesar de contener el mismo metal de interés.

Por lo anterior, la factibilidad y máxima eficiencia de separación de una especie mineral contenida en una mena, depende de la identificación de todas las especies minerales y de la caracterización física y química de las mismas para estar en posibilidad de proponer las operaciones unitarias adecuadas que separen a cada una de ellas o solamente la especie mineral de valor.

1.2 Objetivos del proyecto de investigación

1.2.1 Objetivo General:

Caracterizar un mineral aurífero proveniente de la región de Nocupétaro Michoacán, para proponer el proceso para su beneficio primero a nivel laboratorio y proponer el procedimiento a nivel industrial.

1.2.2 Objetivos Particulares:

- Caracterizar física y químicamente el mineral de cabeza para establecer la factibilidad de su proceso de beneficio.
- Proponer una ruta de procesamiento y beneficio del mineral aurífero a nivel de laboratorio.
- Concentrar el mineral previo estudio de liberación y caracterizar el concentrado obtenido de acuerdo al proceso de beneficio propuesto.
- Establecer la factibilidad económica en base al procedimiento propuesto de obtención de un concentrado mineral de oro, calculando el punto de equilibrio.

1.3 Hipótesis.

La estimación y medición de las características químicas y físicas de un mineral aurífero permitirán el diseño de un procedimiento para su procesamiento hasta su concentración, tomando ventaja de propiedades como mojabilidad, susceptibilidad magnética y gravedad específica.

1.4 Metas científicas

Establecer un procedimiento de procesamiento y de beneficio de un mineral aurífero, que resulte en recuperaciones de mayores al 30 % a nivel de laboratorio.

Establecer el régimen de extracción y procesamiento (ton/día) viable, que indiquen el punto de equilibrio (\$ invertido = \$ obtenido) en el procesamiento y beneficio del mineral, en base a los costos de operación.

CAPÍTULO II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Oro.

Elemento químico de símbolo Au que proviene del latín aurum (amanecer radiante), número atómico 79 y peso atómico 196.967 uma; es un metal muy denso, blando y de color amarillo intenso. El oro se clasifica como metal pesado y noble; en el comercio es el más común de los metales preciosos. El cobre, la plata y el oro están en el mismo grupo en la tabla periódica. La densidad del oro es 19.3 veces la del agua a 20°C (68°F), tal que 1 m³ de oro pesa cerca de 19000 kg (1 pie³, unas 1200 libras). Las masas del oro, al igual que otros metales preciosos, se miden en la escala Troy, la cual contiene 12 onzas por libra. Se funde a 1063°C (1947.97°F) y ebulle a 2970°C (5180°F). Es algo volátil por debajo de su punto de ebullición. Es un buen conductor de calor y electricidad. Es el metal más dúctil y maleable. Pueden hacerse láminas transparentes, con espesor de 0.00001 mm con facilidad o estirarlo en alambres con pesos de 0.5 mg/m. Su calidad se expresa en la escala de finura como partes de oro puro por mil partes de metal total, o en la escala de quilate como partes de oro puro por 24 partes de metal total. El oro se disuelve con facilidad en mercurio para formar amalgamas. Es uno de los metales menos reactivos químicamente. No pierde lustre, ni se quema al aire. Es inerte en soluciones fuertemente alcalinas y en todos los ácidos puros, menos el ácido selénico [5].

2.2 Yacimientos de oro.

El oro al igual que otros minerales, tiene su origen principalmente en procesos hidrotermales formando diversos tipos de yacimientos de acuerdo con las condiciones estructurales y tipo de roca encajonante formando vetas, chimeas, mantos, etc. Así mismo, puede presentarse mediante otros procesos geológicos como metasomatismo de contacto, reemplazamiento metasomático, metamórficos y concentración residual y mecánica (placeres) [6].

El oro es uno de los pocos metales que se encuentra nativo en la naturaleza, Figura 2.1. Por su inalterabilidad a casi todos los elementos químicos, este metal se encuentra en forma natural en muchas capas de la corteza terrestre.



Figura 2. 1 Oro nativo. 1612 gramos, Eureka mine, California.

El oro, además del estado nativo y del oro electrum (mezcla nativa de oro y plata), se da en las siguientes sales: arsenopirita (FeAsS), calcopirita (CuFeS_2), pirita (FeS_2), pirrotita (Fe_7S_8), etc; y asociado en forma de: calaverita (AuTe_2), nagyagita [$\text{Pb}_3(\text{Pb,Sb})_3\text{S}_6](\text{Au,Te})_3$], y silvanita [$(\text{Au,Ag})_2\text{Te}_4$] [5].

El oro, como otros metales pesados, por su afinidad química, su densidad y su propio peso, formó en el proceso geológico lo que hoy se llama “yacimientos” que se hallan en distintas profundidades, a veces junto con otros minerales muy variados y que generalmente se clasifican en cuatro tipos para su explotación:

- 1.- Depósitos aluviales o placeres.
- 2.- Skarn, rebosadero o reventones.
- 3.- Capas o mantos.

4.- Vetas, filones vetarrones y oro diseminado, que se dan por zonas, con la ventaja de que en cada una donde existen estos yacimientos es casi seguro que se den otros más, no siempre al mismo nivel, sino en capas inferiores o superiores [6].

Comúnmente los yacimientos de oro se explotan en minas de cielo abierto, la Figura 2.2 muestra un ejemplo de ella.

2.3 Situación de la minería en México.

La metalurgia extractiva o minera está relacionada con la obtención de metales y sus derivados a partir de las fuentes primarias como son los minerales [7]. La industria minera mexicana es un sector productivo centenario que a través de su aportación económica, histórica y cultural, ha sido y seguirá siendo una de las palancas estratégicas que apoyen el desarrollo y crecimiento de México [8].

En 2015 cuatro metales aportaron el 78.8% del valor total nacional, el oro alcanzó una participación notable con 34.1%, seguido por el cobre con 19.7%, la plata con 18.5% y zinc con 6.5%, entre otros. En la Figura 2.2 se representan los porcentajes anteriores para una mejor comprensión [8].

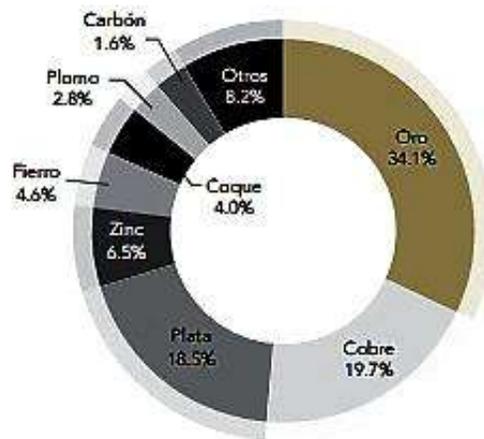


Figura 2. 2 Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2015 (213 462 millones de pesos) [8].

En la Figura 2.3 se presenta la participación de México en la producción mineral mundial en el año 2015. De los datos presentados en la figura 2.4 se puede apreciar que México ocupa el 1° lugar en producción en plata, 2° lugar en producción de fluorita, 3° lugar en producción de bismuto, celestita, wollastonita y sulfato de sodio, 5° lugar en producción de barita, cadmio, molibdeno y plomo, 6° lugar en producción de grafito, sal y zinc, 7° lugar en diatomita, oro y yeso, 9° lugar en producción de arena sílica y manganeso, 10° lugar en cobre, 11° lugar en azufre y caolín y 13° lugar en producción de fosforita [9].



Figura 2. 3 Participación de México en la producción minera mundial en 2015 [9].

En la Figura 2.4 se presentan las cifras de producción de oro y plata en volumen (toneladas) y el valor en miles de pesos que se obtuvieron en los años 2014 y 2015 en México [9].

Se puede observar que la producción en volumen (Kg) de oro del 2014 al 2015, aumentó significativamente en un 25.7%, mientras que para la plata se obtuvo un aumento en volumen de 4.9%, sin embargo, las toneladas de plata producidas son superiores a las de oro, es por esta razón que México se sitúa en el primer puesto como productor de plata en la minería mundial. En cuestión de valor monetario (miles de pesos), de 2014 a 2015 el oro registró un aumento del 37.1% y para la plata se obtuvo un aumento del 2.9%, dando como resultado un aumento del 22.7% tan solo para estos dos metales preciosos.

P R O D U C T O S	VOLUMEN (TONELADAS)			VALOR (MILES DE PESOS)		
	2014	2015	2015/2014 %	2014	2015	2015/2014 %
TOTAL				197,033,657.8	213,462,391.4	8.3
I - METALES PRECIOSOS ^{1,2}				91,610,261.5	112,442,020.6	22.7
Oro (Kgs.)	98,166	123,364	25.7	53,131,430.5	72,844,861.1	37.1
Plata (Kgs.)	4,729,407	4,959,383	4.9	38,478,831.0	39,597,159.6	2.9

Figura 2. 4 Volumen y valor de la producción minero-metalúrgica, 2014-2015 [9].

El estado de Guanajuato se ha caracterizado por explotar sus recursos minerales que datan desde antes del siglo XX. Ramos y col. [10] analizaron los aspectos geológicos y los métodos de beneficio usados históricamente en el Distrito Minero de Guanajuato para plantear hipótesis respecto a las condiciones geoquímicas que pueden encontrarse en los residuos de la extracción. Compilaron información sobre las condiciones geográficas del distrito, los tipos de mena, la historia de producción, los procesos de beneficio y las toneladas de oro y plata recuperadas. Encontraron que en México, los métodos empleados actualmente para la recuperación de oro y plata de yacimientos epitermales, según la mineralogía de la mena, son: (1) fundición de concentrados de la flotación, recuperando oro y plata como principales, (2) fundición de concentrados o menas de alta ley recuperando oro y plata como subproductos, (3) lixiviación con cianuro o tiosulfato de concentrados o menas de baja ley. Actualmente, en el Distrito de Guanajuato se aplica principalmente la flotación y en menor grado, la cianuración; en ambos se recupera un concentrado metálico menor al 5 % del volumen total procesado [10].

2.4 Situación de la minería en Michoacán.

La evolución y el ambiente geológico del estado de Michoacán son propicios para contener yacimientos de minerales tanto metálicos como no metálicos. Los principales yacimientos de minerales metálicos conocidos en el estado, ubicados en la Sierra Madre del Sur, son de hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y en menor proporción oro (Au), plata (Ag) y plomo (Pb). Existen algunos pequeños depósitos con molibdeno (Mo), tungsteno (W) y antimonio (Sb). Se conoce también algunos yacimientos de manganeso (Mn) y estaño (Sn) [11]. En la figura 2.6 se presenta un panorama general de la producción minera del estado de Michoacán para materiales metálicos y no metálicos de los años 2011 al 2015 [12].

En la Figura 2.5 se presenta un resumen del valor monetario correspondiente a la producción minera del estado de Michoacán para materiales metálicos y no metálicos. Se observa que Michoacán figura como productor de oro a nivel nacional, teniendo un aumento en producción de oro para el año 2015 y una ligera disminución de plata, sin embargo, se aprecia que en dicho año se tuvo mayor producción que en el 2011 y 2012.

PRODUCTO	2011	2012	2013	2014	2015/p
Metálicos					
ORO (Kg.)	29	27	27	27	263
PLATA (Kg.)	1,118	1,523	2,513	2,148	2,048
COBRE	1,095	1,059	1,117	1,192	598
FIERRO	3,247,806	4,049,927	7,585,529	4,894,212	2,865,100
PLOMO	4	15	5	3	-
No Metálicos					
AGREGADOS PETREOS	766,749	817,298	1,274,187	5,108,634	4,064,479
ARCILLAS	-	-	1,476	1,181	1,500
ARENA	168	50,544	91,024	166,360	243,640
BARITA	-	299	-	-	-
CALIZA	310,000	334,560	306,765	431,279	166,000
CANTERA	79,988	251,976	224,290	167,600	9,144
CAOLÍN	2,996	5,231	4,800	4,583	4,700
DIATOMITA	130	180	150	203	208
DOLOMITA	15	-	-	-	-
GRAVA 2/	-	56,160	109,581	70,548	225,000
ROCAS DIMENSION.	230	1,560	1,200	960	200
TEZONTLE	14,000	9,552	7,550	11,062,960	9,571,850
TIERRAS FULLER	1,771	5,936	5,045	-	-
YESO	282	320	330	340	500

Figura 2. 5 Volumen de la producción minera estatal 2011-2015 (toneladas) [12].

Los valores presentados en la tabla anterior, se pueden comparar con los valores mostrados en la Figura 2.6, donde se resume el valor de la producción minera estatal en pesos. Nuevamente se puede apreciar el aumento significativo que hubo en la producción de oro en el año 2015 en comparación al 2011, 2012, 2013 y 2014.

PRODUCTO	2011	2012	2013	2014	2015/p
Total	2,065,664,351	2,672,953,500	4,821,948,093	5,996,970,818	5,576,765,658
Metálicos	1,948,300,378.19	2,513,247,296	4,591,845,475	3,015,597,197	1,892,222,751
ORO	18,537,719	19,138,104	15,595,185	14,829,994	155,416,227
PLATA	15,737,438	20,066,440	24,487,214	17,476,299	16,351,829
COBRE	118,674,974	110,699,919	104,334,946	108,626,232	51,913,876
FIERRO	1,795,231,643	2,362,935,616	4,447,291,348	2,874,581,103	1,668,540,819
PLOMO	118,605	407,215	136,782	83,570	-
No Metálicos	117,363,972	159,706,204	230,102,618	2,981,373,621	3,684,542,907
AGREGADOS PET.	80,986,178	89,407,119	144,475,478	602,883,037	489,876,376
ARCILLAS	-	-	171,047	142,420	108,743
ARENA	17,927	5,586,027	10,417,929	19,817,172	21,422,563
BARITA	-	401,909	-	-	-
CALIZA	21,560,144	24,098,941	22,883,495	22,032,502	20,908,409
CANTERA	4,410,954	14,391,327	20,919,861	16,270,098	13,423,617
CAOLÍN	7,533,696	10,818,382	10,911,824	11,852,045	10,716,192
DIATOMITA	397,404	592,005	511,043	738,898	767,752
DOLOMITA	1,451	-	-	-	-
GRAVA	-	6,397,580	12,927,542	8,662,228	12,654,839
ROCAS DIMENS.	225,680	1,783,383	1,418,515	1,181,112	137,786
TEZONTLE	527,147	372,505	304,914	465,016,718	505,095,110
TIERRAS FULLER	1,677,705	5,824,392	5,126,980	-	-
YESO	25,686	32,633	33,991	38,885	74,512

Figura 2. 6 Valor de la producción minera estatal 2011-2015 (pesos corrientes) [12]

2.5 Producción de oro y plata en la región de Tierra Caliente en el estado de Michoacán.

En las zonas mineras de Tiquicheo y San Ignacio, existen varias minas en yacimientos vetiformes con mineralización polimetálica de sulfuros de zinc, plomo y cobre, con presencia de plata e indicios de oro. Las rocas encajonantes de estos yacimientos son andesitas y tobas andesíticas, y a profundidad areniscas y conglomerados. Algunos de estos depósitos, como La Alejandra y La

Andrea, alcanzan dimensiones apreciables, del orden de los 2-3 Km de longitud y 2.0 m de espesor [11].

La mina activa más importante de la región conocida como El Bastán, está formada por cortado en andesitas, lavas vítreas y tobas andesíticas, se encuentra ubicada en las dimensiones del poblado del mismo nombre. Consiste en una serie de cuerpos vetiformes de diversos espesores y longitudes, con rellenos de fisura, brechas y zonas de dimensiones con mineralización de cobre, molibdeno, hierro, tungsteno y valores de plata y oro. En los alrededores de esta mina existen varios prospectos como Vista Hermosa, La Higuera y otros, que se consideran con posibilidades para aumentar las reservas de mineral [11].

Actualmente existen 5 plantas de beneficio de minerales metálicos, con una capacidad instalada de 11150 t/día; se encuentran activas 4 que producen 11090 t/día, que representa el 94.30% de la capacidad, Figura 2.7.

No.	EMPRESA	MUNICIPIO	SUBSTANCIA	PRODUCCIÓN t/día	SISTEMA DE OPERACIÓN	SITUACIÓN ACTUAL
1	ARCELOR MITTAL STEEL.	Lázaro Cárdenas	Fierro	10,000	Concentración magnética	Activa
2	Cía. Minera El Baztán , S.A.	Huetamo	Cu, Au, Ag, Pb, Zn	800	Flotación	Activa
3	Cía. Minera Los Encinos S.A. de C.V.	La Huacana	Au, Ag, Cu	250	Flotación	Activa
4	Cía. Minera La Huacana	La Huacana	Cu, Au, Ag, Pb	60	Flotación	Activa
5	Cía. Minera e Industrial de Michoacán, S.A.	Huetamo	Au	40	Lixiviación en montones	Activa??

Figura 2. 7 Producción de las minas activas en la región de Tierra Caliente [11].

2.6 Caracterización física y química de un mineral.

La caracterización completa de un mineral, implica el conocimiento de la composición química y el estudio de sus propiedades, tanto físicas como químicas y está claro, que existen interconexiones entre todos estos aspectos. Inicialmente se realiza el análisis químico cualitativo y cuantitativo para conocer los aspectos anteriormente mencionados.

Los primeros pasos han de darse en el propio yacimiento, al reconocer el ambiente geológico y tomar nota exacta de la ubicación. También en el mismo lugar, se pueden reconocer algunas de sus propiedades. Posteriormente, en los laboratorios, se deberán estudiar las demás características y proceder a su análisis químico para conocer su composición y relacionarla con las propiedades químicas que también se determinan. A todos estos procesos, deberá complementar el estudio estructural, el cual a su vez servirá para explicar muchas de las propiedades antes observadas e incluso, para descubrir otras nuevas.

Melgarejo y col. [2], presentan una síntesis de las técnicas analíticas más utilizadas en la caracterización mineral y su aplicación a la exploración y explotación minera. En su investigación hace una clasificación en 2 grupos, el primero incluye las técnicas de mayor uso, llamadas técnicas convencionales y el segundo grupo abarca técnicas menos accesibles. Para la caracterización física y química del mineral que se plantea en este trabajo solo se empleó la técnica de difracción de rayos X.

De manera similar, Ojeda y col. [13] se refiere al estudio de caracterización como un conjunto de técnicas empleadas para conocer la mineralogía de una muestra y poder identificar minerales de interés económico, los que no son de interés como ganga, los minerales que son penalizados, etc., así como determinar grados de liberación y asociaciones de los mismos. La caracterización que se plantea arroja datos cualitativos y cuantitativos y de esta manera obtener un estudio más completo sobre el mineral y así poder determinar la manera más factible para su explotación.

2.6.1 Difracción de rayos X.

La difracción de rayos X (DRX) es un proceso en donde los rayos X que inciden sobre un material cristalino y son reflejados por los átomos, que presentan cierto ordenamiento, cumpliendo cierto acomodo dependiendo de la forma geométrica o estructura cristalina que formen. El patrón de rayos X resultante es característico de cada material y se puede utilizar para identificarlos o conocer la geometría de la celda unitaria que presentan en su estructura cristalina [14].

La difracción es el resultado del fenómeno conocido como "dispersión". Los campos eléctricos periódicamente cambiantes de las ondas entrantes de rayos X excitan los electrones de los átomos

a vibraciones periódicas; estos electrones se convierten en la fuente de rayos X secundarios con la misma longitud de onda que los rayos X entrantes (dispersión coherente) [14].

Con el método de polvos, para difracción de rayos X, se obtiene una lista de espaciados e intensidades de la forma más rápida y sencilla. El programa arroja un gráfico (difractograma) que en abscisas indica el ángulo de difracción y en ordenadas la intensidad correspondiente. Los máximos o picos de intensidad corresponden a reflexiones de Bragg. Obtenido el difractograma y extraídos los datos de difracción de la muestra problema, la identificación consiste en hallar en la base de datos el mineral cuyo difractograma corresponde con el problema. Como conclusión, se puede afirmar que el método de difracción de polvo es muy eficiente para la identificación de polvos minerales, individuales o mezclados. La difracción de rayos X permite análisis en donde es posible obtener una composición mineralógica cualitativa de las especies más abundantes y que no se obtiene por ninguna otra técnica [2, 13].

Betancourth y col. [15] señalan que difracción de rayos X (DRX) es una técnica de análisis químico cualitativo que puede emplearse como primera prueba de caracterización muestras minerales, ya que por medio de esta técnica se pueden conocer las especies mineralógica que constituyen a dichas muestras y dando un primer indicio de los elementos químicos que la conforman.

El método de polvos por DRX requiere únicamente que la muestra a analizar se encuentre pulverizada, lo que lleva éste método a que sea uno de los más utilizados para la identificación de minerales por su simplicidad para la preparación de las muestras como en la información que se puede obtener.

2.6.2 Espectroscopia de absorción atómica.

La digestión de muestras minerales con agua regia y asistida por horno de microondas, es uno de los procedimientos estándar en la preparación de muestras para el análisis elemental en química analítica.

El agua regia es una mezcla de ácidos altamente corrosiva de color amarillo. La solución se forma por la mezcla del ácido nítrico concentrado y el ácido clorhídrico concentrado en una relación en volumen de 1:3. Se llama así porque puede disolver los llamados metales reales o metales nobles, oro y platino.

El agua regia es un disolvente poderoso debido al efecto combinado de los iones H^+ , NO_3^- y Cl^- . Los tres iones reaccionan con los átomos del oro, por ejemplo, al formar agua, óxido nítrico o monóxido de nitrógeno y el ión estable $AuCl_4^-$ que permanece en solución [18,19]. A continuación se presentan la reacción general del proceso de disolución de oro con agua regia.



Como se mencionó anteriormente, la digestión de las muestras minerales se puede llevar a cabo en horno de microondas o en vaso abierto, la primera presenta una ventaja respecto a la segunda, ya que cuando se asiste por horno se tiene la posibilidad de controlar de forma precisa parámetros que son se pueden controlar en vaso abierto, tales como la presión y la temperatura, además de que los tiempos dentro del horno son considerablemente reducidos debido a la rápida velocidad de calentamiento dentro de este.

Kazi E. Haque [18], recopiló información que demuestra que la energía de microondas tiene el potencial de aplicación en procesos de tratamiento de minerales y recuperación de metales, tales como calentamiento, secado, molienda, lixiviación, fundición, reducción carbotérmica de minerales de óxido, pretratamiento de concentrado de oro refractario o mineral. Siendo el horno de microondas una herramienta versátil en el tratamiento de muestras minerales.

Una vez realizada la digestión de la muestra mineral mediante la adición de agua regia y la asistencia del horno de microondas, se procede a cuantificar el contenido del metal de valor mediante la técnica cuantitativa de Espectrometría de Absorción Atómica. Dicha técnica, junto con el método de atomización de llama, ha sido la más utilizada para la identificación de elementos simples en muestras analíticas [19].

Los instrumentos espectroscópicos típicos están compuestos por cinco componentes: 1) una fuente estable de energía radiante; 2) un recipiente transparente en donde se coloca la muestra; 3) un dispositivo que aísla una región restringida del espectro para efectuar las mediciones; 4) un detector de radiación que convierte la energía radiante en una señal eléctrica útil y 5) una unidad que procesa las señales y despliega resultados, la cual exhibe la señal que entrega el transductor

en la escala de un medidor, una pantalla de computadora, un medidor digital u otro dispositivo de registro. La Figura 2.8, ilustra los componentes del instrumento para espectroscopia [19].

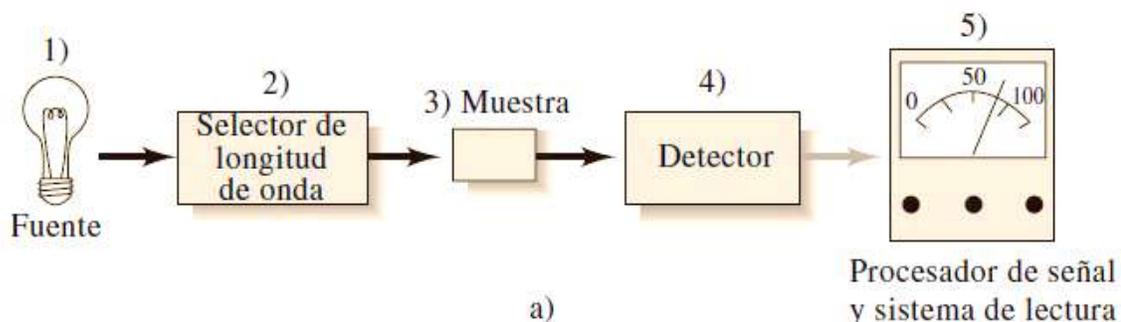


Figura 2. 8 Muestra el acomodo para las mediciones de absorción. Observe que la fuente de radiación de la longitud de onda seleccionada se envía desde la fuente a través de la muestra, y la radiación transmitida se mide por medio de la unidad detector-procesador de la señal y sistema de lectura [19].

Una parte muy importante de todos los procedimientos analíticos es la calibración y estandarización del proceso. La calibración determina la relación entre la respuesta analítica y la concentración del analito. Los estándares externos se usan para calibrar instrumentos y procedimientos cuando no hay efectos de interferencia de la matriz de componentes sobre la disolución del analito [19]. Se prepara una serie de estándares externos que contienen el analito en concentraciones conocidas. Lo ideal es usar tres o más de las disoluciones en el proceso de calibración, obteniendo una curva que debe ser lineal, mientras progresa según la ley de Lambert Beer [20].

$$A = abc \tag{2.2}$$

Donde:

A = Absorbancia.

a = Constante de proporcionalidad (absortividad, L/gcm).

b = Longitud de la trayectoria del medio acuoso (cm).

c = Concentración (g/L).

2.6.3 Microscopía Electrónica de Barrido.

El microscopio electrónico de barrido posibilita conocer la morfología superficial de las muestras que se desea analizar. En el microscopio electrónico de barrido (MEB), el haz electrónico, atraviesa la columna y llega a la muestra. Un generador de barrido es el responsable de producir el movimiento del haz, de manera que barre la muestra punto a punto. De la interacción entre los electrones incidentes con los átomos que componen la muestra se generan señales, las cuales pueden ser captadas con detectores específicos para cada una de ellas. El detector capta una señal y las convierte en una señal electrónica que es proyectada en una pantalla [21].

La microscopía electrónica de barrido se emplea en este tipo de muestra principalmente para conocer la morfología de las partículas de mineral pulverizado que se desean caracterizar.

2.6.4 Determinación de tamaño de partículas.

En general, se trata de describir el tamaño de partícula mediante una sola cantidad, como diámetro, volumen o área superficial. La distribución del tamaño de partícula es una gráfica del número de partículas que tienen un valor único de la cantidad elegida frente a la misma cantidad o bien una distribución acumulada que representa la fracción de partículas más grandes o más pequeñas de un tamaño característico.

La técnica de dispersión de luz láser de ángulo bajo (DLAB) llamada también difracción laser, es uno de los métodos de empleo más común para medir tamaños de partícula y distribuciones de tamaño de 0.1 μm a 2000 μm . Las mediciones se hacen exponiendo la muestra a un haz de luz y detectando los patrones angulares de luz dispersada por partículas de distintos tamaños [22].

2.6.5 Densidad del mineral.

La densidad de los minerales se define como la masa que tiene una unidad de volumen de una determinada cantidad de masa, en este caso de mineral. La fórmula para obtener la densidad es igual a la masa de un objeto entre el volumen que desplazó dicha masa [23]:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.3)$$

Tabla 2. 1 Densidades de algunos minerales [24].

Mineral	Densidad (g/cm ³)
Oro (Au)	19.3
Galena (PbS)	7.6
Pirita (FeS ₂)	5.2
Olivino (Mg,Fe) ₂ [SiO ₄]	3.2 – 4.4
Calcita (CaCO ₃)	2.7
K-feldespato [K(AlSi ₃ O ₈)]	2.6
Cuarzo (SiO ₂)	2.6
Halita (NaCl)	2.2

2.6.6 Susceptibilidad magnética.

Es la propiedad de un material que determina su respuesta a un campo magnético. Con base en esta propiedad, los materiales pueden dividirse en dos grupos: *materiales paramagnéticos*, o sea los atraídos por un campo magnético y *materiales diamagnéticos*, los cuales son repelidos por el campo magnético. En el procesamiento de minerales es común clasificar los minerales vigorosamente paramagnéticos en una categoría llamada *ferromagnéticos*. La Tabla 2.2 muestra los valores de susceptibilidad magnética de algunos minerales, siendo hierro el de mayor susceptibilidad magnética relativa y al cual se le asigna el 100, partiendo de esta idea la susceptibilidad magnética relativa para los siguientes minerales presentados en la tabla comienza a disminuir [25, 26]

Tabla 2. 2 Susceptibilidad magnética de algunos minerales [25]

Mineral	Susceptibilidad relativa
Grupo 1. Ferromagnéticos	
Hierro	100.00
Magnetita	48.000
Franklinita	13.089
Grupo 2. Moderadamente magnéticos	
Ilmenita	9.139
Mica	5.880
Pirrotita	2.490
Grupo 3. Débilmente magnéticos	
Hematita	0.769
Pirita	0.248
Cuarzo	0.175
Molibdenita	0.118
Wolframita	0.105
Argentita	0.102
Esfalerita	0.057
Dolomita	0.057
Calcopirita	0.051
Grupo 4. Muy débilmente magnéticos	
Criolita	0.019
Magnesita	0.019
Yeso	0.016
Ortoclasa	0.0032
Zafiro	0.0023
Feldespatos	0.0006
Circón	0.0002
Grupo 5. No magnéticos y diamagnéticos.	

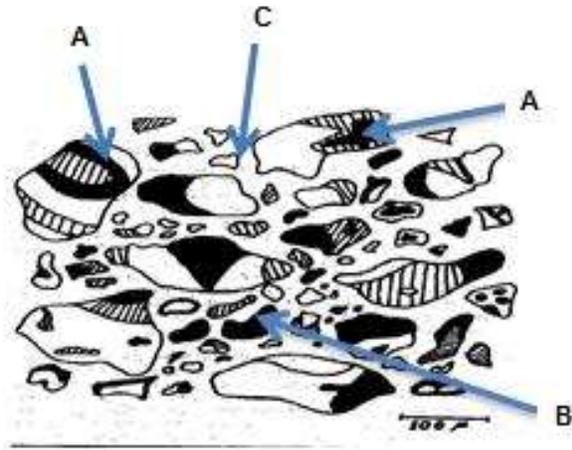
Calcita	-0.0004
Fluorita	-0,0004
Halita	-0.0004
Grafito	-0.0056

2.7 Liberación de especies minerales.

Un prerrequisito esencial para la separación de un mineral en sus fracciones de valor y de desecho, es la liberación de las partículas de interés de las que no lo son para su futuro beneficio. El grado de liberación es el porcentaje de un mineral dado que existe en la forma de partículas libres, es decir, partículas que contienen sólo ese mineral. Las partículas que contienen a la vez los minerales de valor y de desecho se conocen como partículas no liberadas o intermedias y gran parte de las dificultades que se experimentan en la separación de minerales radica en el tratamiento de esta partículas [27].

Otro objetivo primordial con este estudio de liberación es el establecer la potencia mínima invertida por las máquinas de reducción de tamaño, para alcanzar la liberación máxima de especies minerales de valor; esto, si se hace referencia al dato práctico que indica que del total de la energía invertida por una máquina para efectuar el trabajo de fractura de las partículas minerales, solamente el 10% se aprovecha para tal efecto y el 90% restante se pierde como calor.

La Figura 2.9 muestra esquemáticamente el concepto de liberación de especies por medios físicos como son trituración y molienda; donde se aprecia especies de valor liberadas otras atrapadas mecánicamente, incluso algunas otras formando aleaciones [27].



- A= Partículas con especie de valor aun atrapadas.
- B= Partículas de valor liberadas.
- C= Partículas sin valor liberadas.

Figura 2. 9 Esquema del concepto de liberación de especies [27].

2.8 Diseño de las etapas unitarias para el procesamiento del mineral.

Una vez caracterizado química y físicamente el mineral en cuestión, se está en posibilidad de diseñar el procedimiento general para procesarlo. Al considerar los circuitos de procesamiento de minerales, hay dos factores particularmente significativos. Primero, cada mineral es único y por lo tanto requiere de un diagrama de proceso único para obtener el rendimiento óptimo. El segundo se refiere a las interrelaciones entre las diversas operaciones del proceso. Aunque cada unidad de equipo se encuentra en la planta para un propósito específico, cualquier cambio que ocurra en la operación de una unidad afecta el comportamiento de las operaciones subsecuentes, o bien, cuando hay reciclado, en las operaciones precedentes [28].

Con la anterior información se realizan pruebas de procesamiento a nivel laboratorio. Se llevan a cabo los respectivos ajustes a las variables de operación de los equipos involucrados para finalmente realizar pruebas a nivel piloto en el campo.

El diseño de la planta es un proceso largo que se inicia con un estudio de viabilidad que implica el muestreo del cuerpo mineralizado, la evaluación y prueba de los métodos de procesamiento del mineral, la selección y determinación de la capacidad de los equipos, el plano general de distribución de la planta, su arranque y su optimización. [3, 6, 7].

2.9 Procesos metalúrgicos para el beneficio de minerales auríferos.

Los minerales auríferos se encuentran en la naturaleza en diversas formas; en algunos casos, la recuperación de oro por métodos convencionales es limitada y pobre, debido a que algunos constituyentes que acompañan al metal precioso hacen difícil o imposible el beneficio metalúrgico [29].

En seguida se describen los procesos comúnmente utilizados para la concentración de minerales auríferos:

2.9.1 Métodos gravimétricos.

A continuación se analizan los principales métodos de concentración que aprovechan las diferencias de densidades para llevar a cabo la separación por medio fluido. Sin embargo, puede usarse aire en caso de existir una escasez de agua o cuando se obtenga otro beneficio especial en su utilización [26].

Los métodos de separación gravimétrica se usan para tratar una gran variedad de minerales que varían desde los sulfuros pesados como la galena (peso específico 7.6) hasta el carbón (peso específico 1.3) y tamaños de partículas en algunos casos por debajo de 50 μm .

Las plantas de concentración gravimétrica tienen dos propósitos:

- Separación de acuerdo a una clasificación de minerales con la misma densidad (clasificación).
- Separación de acuerdo a diferentes densidades de minerales de aproximadamente el mismo rango de tamaño (concentración).

La concentración gravimétrica separa minerales de diferentes densidades debido a un movimiento relativo ocasionado por la gravedad y otras fuerzas, como la que ofrece al movimiento de un cuerpo un fluido viscoso como el agua, aire, etc. Una idea del tipo de separación posible puede obtenerse de la relación:

$$FC = \frac{D_h - D_f}{D_t - D_f} \quad (2.4)$$

Donde D_h es el peso específico del mineral pesado, D_l es el peso específico del mineral liviano y D_f es el peso específico del medio fluido. En términos generales, cuando el cociente es mayor que 2.5, ya sea positivo o negativo, la separación gravimétrica es fácil. Cuando este valor va decreciendo, la eficiencia de la separación también decrece y por debajo de 1.25 la separación gravimétrica ya no es factible económicamente [26].

Los equipos más conocidos de separación gravimétrica de oro son [26]:

- **Jigs.**- Son normalmente usados para concentrar material relativamente grueso y si el material de alimentación es relativamente uniforme (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 (peso específico 3.2), del cuarzo (peso específico 2.6) y si la diferencia de pesos específicos es mayor la separación será mejor.
- **Canaletas.**- Son mesas rayadas, donde la inclinación de la canaleta varía según la forma de operación y el tamaño de grano de la alimentación: de 2° a 8° se usa para la pre concentración de alimentación de minerales pesados; alrededor de 14° para post lavado de concentrados clasificados con estrecho rango de tamaño de grano. Las canaletas pueden ser de 2 m de largo por 0.5 m de ancho por 0.5 m de profundidad.
- **Conos.**- El cono Reichert, es un dispositivo de concentración por gravedad en húmedo diseñado para instalaciones de gran capacidad. Su principio de operación es el mismo que el de las canaletas descritas anteriormente pero el flujo no está restringido o influenciado por las paredes laterales. Una unidad industrial consta de varios conos instalados uno sobre otro que conducen a una mejor recuperación. Estos conos se fabrican en fibra de vidrio y vienen en estructuras de 6 m de alto. Los conos tienen un diámetro de 2 m y no se mueven.
- **Espirales.**- Los concentradores a espiral han encontrado muchas aplicaciones con buenos resultados. Se usan desde 1943. Tiene una forma semicircular. La pulpa debe ingresar con un 15 a 45% de sólidos y un tamaño entre 3 mm y 75 mm en la parte superior del equipo.
- **Mesas Concentradoras.**- La mesa es una superficie plana ligeramente inclinada (Figura 2.10) a la cual llega la pulpa mineral (mineral pulverizado + agua) con un 25 % de sólidos en peso por medio de un cajón alimentador y es distribuida a lo largo de C; el agua de

limpieza es suministrada a lo largo de la canaleta D. La mesa vibra longitudinalmente por medio del mecanismo B y las partículas de mineral se arrastran lentamente a lo largo de la mesa y paralela a la dirección de su movimiento.

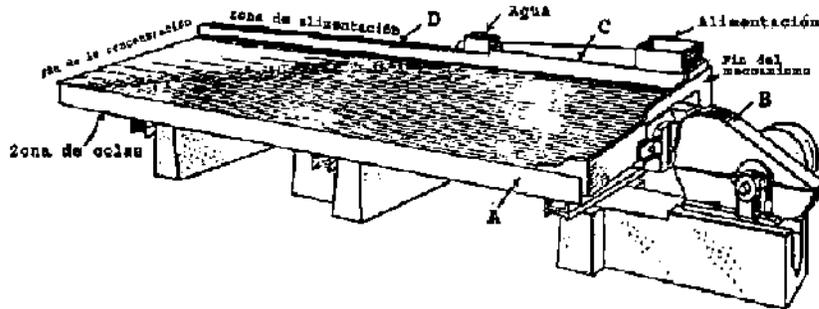


Figura 2. 10 Mesa de concentración gravimétrica (Wifley).

- **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 son usados en los circuitos de molienda para separar oro libre y evitar sobre molienda, cianuración o flotación. 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.

Actualmente la concentración centrífuga se ha considerado como tecnología de vanguardia para el beneficio de minerales, ya que se trata de un proceso económico debido a que permite capturar partículas finas de oro, platino, plata, estaño, etc., empleando solo la fuerza centrífuga y agua como elemento que ayuda a la separación de dichas partículas. También se dice que es un proceso amigable con el medio ambiente, pues solo emplea directamente agua. Considerando que los requerimientos ambientales son cada vez más estrictos, la concentración centrífuga se puede convertir en la única tecnología disponible para explotar algunos tipos de depósitos y por último,

la aplicación de campos centrífugos grandes permite la recuperación de partículas muy finas (10 μm) , lo cual no es posible con otro tipo de equipos gravimétricos (jigs, espirales, canaletas, etc.)

Teschner et al [30] demuestra un método simple y mínimamente invasivo para estimar la tasa de recuperación de oro de los equipos de separación gravitatoria utilizados por los mineros artesanales y de pequeña escala en sitios de oro aluvial en las Guayanas, Sudamérica. En ésta localidad los mineros utilizaban el método de amalgamación, lo que hacía la operación de concentración dañina tanto para el personal que estaba en contacto directo con el mineral y el mercurio, como para las personas aledañas a la zona de operación. Por esta razón, era necesario implementa un método nuevo de beneficio para el mineral sin los riesgos que implicaba utilizar mercurio pero a su vez, obteniendo un porcentaje de concentración del metal de valor igual o mejor que el obtenido por amalgamación.

Se obtuvo que la separación gravimétrica funciona perfectamente para el rango de tamaños de partícula que va de 75 a 500 μm , separando aproximadamente el 91% del oro presente en el mineral. Por lo que se concluye que la separación gravimétrica es una excelente opción en el tratamiento de beneficio de minerales auríferos.

2.9.2 Beneficio de mineral aurífero por medio de un elutriador.

Es el proceso por el cual un material granular puede separarse en los diversos tamaños de partículas que lo componen, mediante un fluido en movimiento (generalmente aire o agua), los elutriadores se utilizan mucho en el estudio de sedimentos, para determinar la distribución del tamaño de las partículas.

En la elutriación, los materiales más pequeños y más grandes están forzados a separarse con el uso de una o varias columnas inyectando líquido o gas. Se puede utilizar en el nivel micro o macro, desde la preparación de muestras de células hasta el beneficio de un mineral, como es el caso del presente trabajo reportado.

Por lo general, en una muestra mineral se alimentan tamaños pequeños y grandes de partícula, por lo que es necesario tener conocimiento sobre los tipos de elutriadores que existen y cuál sería el más apropiado para el beneficio de la muestra mineral que se desee tratar.

En el elutriador horizontal, una corriente de partículas suspendidas pasa por una cámara de sedimentación. Las partículas que dejan la corriente se acumula en el fondo de la cámara. Mientras que en el elutriador vertical las partículas de un determinado tamaño ascienden con el fluido, mientras que las más grandes se sedimentan por influencia de la gravedad.

En la elutriación por aire suele producirse un fraccionamiento más neto y en menos tiempo que la elutriación con agua. En la elutriación centrífuga se produce el giro de la corriente del fluido para impartir una gran fuerza centrífuga a las partículas.

Agorhom y col. [31] explican que el empleo de un equipo como el elutriador satisface la necesidad de preconcentrar o beneficiar las partículas de oro y aumentar el grado o ley de cualquier muestra de oro correspondiente a un yacimiento sin cambiar la química de la superficie de éste. Sin embargo, al utilizar un elutriador de corriente vertical de aire, normalmente las partículas finas ($<38 \mu\text{m}$) presentan el fenómeno de aglomeración, por lo que hace ineficiente el empleo de éste equipo para la clasificación o beneficio de partículas menores al tamaño ya mencionado. Por esta razón cambiaron el fluido del elutriador utilizando agua en lugar de aire en la corriente vertical para concentrar las partículas de oro finas ($<38 \mu\text{m}$) en las muestras analizadas, dando como resultado una respuesta favorable en la concentración de las partículas $<38 \mu\text{m}$ ya que al estar suspendidas en el medio acuoso se encuentran completamente dispersas evitando así el fenómeno de aglomeración.

2.9.3 Concentración de mineral aurífero con equipo Falcon.

El principio de separación del concentrador Falcon está basado en la diferencia de pesos específicos de las partículas componentes de una carga mineralizada. Debido a que usa campos gravitatorios altos es capaz de separar minerales liberados en rangos de tamaño considerado como finos a ultra finos [31, 32], donde se observa un aumento en la eficiencia de separación en comparación con otros concentradores gravimétricos. El concentrador centrífugo Falcon fue primeramente diseñado para el beneficio de oro, aunque posteriormente se extendió su aplicación a otros minerales como: estaño, platino, minerales de hierro, illmenita, carbón, etc. Puede asemejarse a un Cono Reichert centrífugo invertido cuya principal diferencia es que la alimentación se realiza por el centro del equipo [34].

Constituido principalmente por un cilindro rotante, donde la geometría del rotor interior en la parte inferior adquiere una forma cónica y en la parte superior una configuración cilíndrica en forma de anillos (Figura 2.11). Gira alrededor de los 2282 rpm, generando una fuerza centrífuga de hasta 300 G (300 veces el valor de la gravedad) [33, 34].

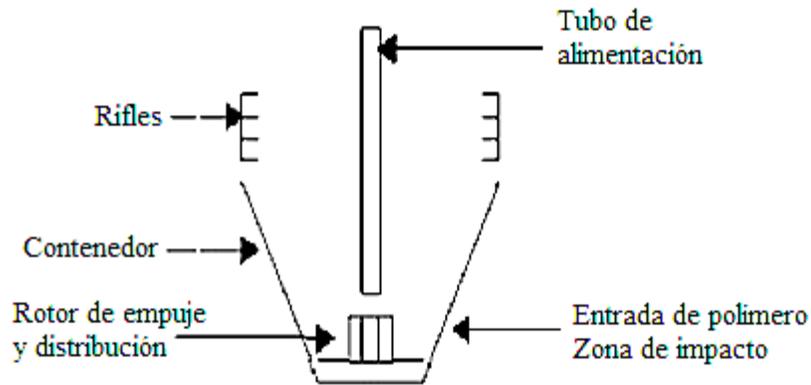


Figura 2. 11 Configuración del rotor del concentrador Falcon [35].

Este equipo responde favorablemente al tratamiento de granulometrías entre 156 a 0.020 mm (10 a 600 mallas Tyler), separando y recuperando material pesado (de mayor peso específico respecto al del estéril) considerado como fino y ultra fino [35].

La pulpa alimentada por la parte central al fondo del cono, experimenta primeramente un proceso de sedimentación, separándose el sólido del líquido, formándose una capa de sedimento (Figura 2.12). Posteriormente, por la acción del agua alimentada a contrapresión y la configuración del cono, el espesor de la capa va disminuyendo por el desprendimiento de las partículas livianas de la capa que retornan a la pulpa para su posterior evacuación como rebose. En esta operación, las partículas pesadas se fijan en la pared interna del cono y son descargados por la parte inferior a través de un cilindro que envuelve al cono. El mecanismo del equipo Falcon se denomina película de separación fluidizada. La revolución de giro del rotor puede ser ajustada para distintos rangos de velocidad y así compensar los cambios en el caudal de la alimentación [34].

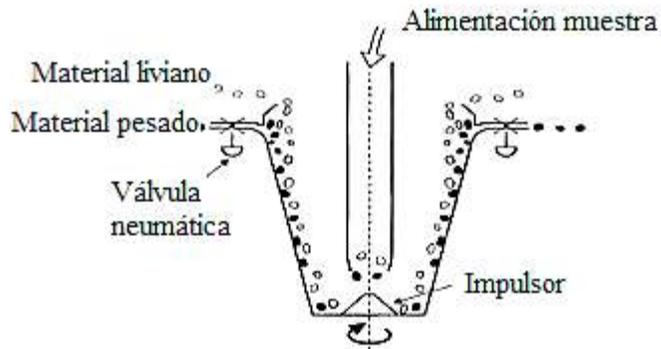


Figura 2. 12 Principio de separación del concentrador Falcon.

Sus principales características son [34]:

- ❖ Bajo consumo de agua
- ❖ Rotor construido de caucho, poliuretano y carburo para una máxima resistencia al desgaste.
- ❖ Pocas partes móviles.
- ❖ Automatización simplificada.
- ❖ Modelos a escala laboratorio con alta capacidad.
- ❖ Modelos disponibles para la recuperación con elevado peso o alimentación con amplio rango de tamaño de partículas.

Desde un punto de vista general, las principales ventajas que ofrecen estos equipos son [34]:

- ❖ Amplio rango de aplicación en el procesamiento industrial de minerales.
- ❖ Recuperaciones elevadas, sobre todo en fracciones finas.
- ❖ Bajos costos de inversión y de operación.
- ❖ Preconcentración y concentración de minerales.

Entre sus aplicaciones podemos citar a [34]:

- ❖ Recuperación de oro fino a partir de yacimiento primario.
- ❖ Retratamiento de sulfuros.

- ❖ Recuperación de hierro y estaño fino.
- ❖ Remoción de ceniza y sulfuros del carbón.
- ❖ Recuperación de oro fino a partir de relaves de flotación ó cianuración
- ❖ Preconcentración antes de la cianuración para maximizar rendimiento.
- ❖ Retratamiento de relaves de tantalio y estaño fino.
- ❖ Retratamiento de hierro fino contenido en relaves.
- ❖ Preconcentración de oro y plata a partir de relaves antiguos.
- ❖ Preconcentración y deslamado de depósitos de minerales pesados.
- ❖ Preconcentración previa a la flotación ó cianuración mediante la remoción de partículas livianas no deseadas.
- ❖ Instalación en circuitos de molienda ciclón para la recuperación de valores liberados.

Diversos estudios han demostrado que con los concentradores tipo Falcon se obtienen buenos resultados en cuanto a la concentración de partículas minerales. Tal es el caso del trabajo realizado por Marion y col. [36] donde analizan el potencial de separación por medios densos para partículas finas aprovechando su gravedad específica. En dicha investigación se compara un equipo Falcon modificado y un concentrador centrífugo de laboratorio, demostrando que la concentración centrífuga usando un medio denso es posible para la recuperación de valores de fracciones de muestras clasificadas como lodos. La modificación que realizaron al concentrador Falcon fue la incorporación de una tapa para sellar el recipiente, permitiendo que la muestra y el líquido pesado se contuvieran durante todo el experimento.

La muestra utilizada para llevar a cabo la experimentación se clasifica como lodos, que consiste en una mezcla de agua con partículas minerales con D_{80} menor a $12 \mu\text{m}$. El mineral fue sometido a separación magnética para retirar la magnetita presente.

De los resultados reportados se puede resumir que, en los dos casos, los minerales pesados con gravedad específica mayor a 4, tales como el zircón, la magnetita y hematita, se están concentrando en la fracción pesada, mientras que los minerales con densidades relativamente bajas, con gravedad específica menor a 3, por ejemplo el cuarzo y feldespatos forman parte de la fracción ligera.

Con el concentrador centrífugo obtuvieron una recuperación del 71% de zircón mientras que con el equipo Falcon modificado, la recuperación del Zr y Fe disminuyó, esto probablemente sucedió debido al hecho de que la aceleración centrífuga en el concentrador Falcon modificado (130 veces la aceleración de la gravedad de la Tierra) es mucho menor que en la centrifuga de laboratorio (2100 veces la aceleración gravitacional de la Tierra).

2.9.4 Concentrador iCON.

El concentrador centrífugo iCON, emplea un campo centrífugo para concentrar oro libre y fino que usualmente no se recupera usando las técnicas tradicionales de operaciones artesanales a pequeña escala. La tecnología está basada en el conocido concentrador Falcon, asimismo el equipo está fabricado por Falcon Concentrators [37]. La Figura 2.13 muestra el diagrama de las partes que conforma el equipo iCON.

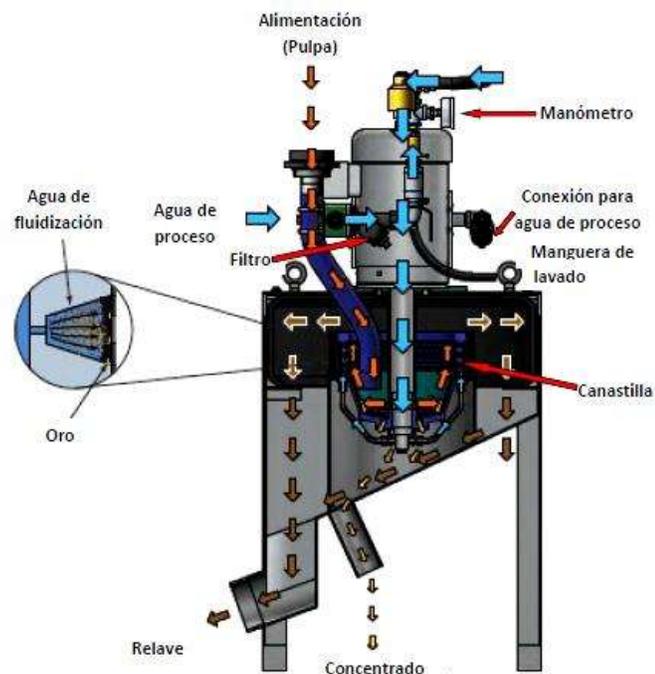


Figura 2. 13 Diagrama del concentrador iCON [37].

Las principales características que hacen del equipo concentrador iCON ideal para aplicaciones tanto a pequeña como a gran escala son:

- ❖ Reducido peso del equipo, solo 100 kilos.
- ❖ Facilidad de instalación
- ❖ Solo una parte móvil.
- ❖ Uso de partes fáciles de encontrar, como cilindros y neumáticos.
- ❖ Bajo costo de adquisición y operación.
- ❖ Basado en una robusta plataforma mecánica-eléctrica.

Las instrucciones de operación del equipo iCON se describen a continuación:

Durante la operación, el material es alimentado con mineral clasificado de molienda en forma de pulpa dentro del tazón rotatorio, que incluye un diseño especial de canales o riffles donde se capturan las partículas de oro. Periódicamente se producirá la cosecha o recolección del concentrado, en este caso rico en partículas de oro [37].

1. Encender el tablero a ON (I), desde OFF (O).
2. Establecer la velocidad de operación.
3. Girar el control de velocidad todo a la derecha para operar.
4. Establecer presión de agua en 2 psi (se puede aumentar hasta 12 psi).
5. Presionar el botón (RUN/STOP) para arrancar el concentrador.
6. Iniciar la alimentación de la pulpa mineral.
7. Colocar un recipiente en la parte baja central para recolectar el concentrado.
8. Después de 30 minutos, aproximadamente, reducir la presión de agua y girar el control de velocidad todo hacia la izquierda para lavar.

9. Abrir el agua de lavado y lavar el concentrado que caerá al recipiente.
10. Repertir la operación si requiere continuar la producción.

Nota: la presión de agua necesaria puede variar significativamente dependiendo de la pulpa de alimentación. Si se encuentra un volumen de concentrado muy bajo entonces disminuir la presión, si el volumen es muy alto entonces incrementar la presión.

Entre las aplicaciones del equipo iCON se encuentran [37]:

- ❖ Recuperación de oro libre, plata, platino de circuitos de molienda en plantas de flotación y/o de cianuración.
- ❖ Recuperación de oro aluvial.
- ❖ Retratamiento de relaves de flotación.
- ❖ Recuperación de oro de escorias de fundición.
- ❖ Limpieza de concentrados.
- ❖ Recuperación de oro de concentrados de cobre, zinc, plomo, etc.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

La metodología experimental se dividió en tres etapas: la primera consiste en la recolección del mineral de cabeza, el cual se obtiene directamente del sitio o yacimiento, así como la identificación de las especies minerales contenidas en las muestras, cuantificación de los valores metálicos de interés y la medición de la densidad de las muestras pulverizadas, de acuerdo a rangos de tamaño de partícula, antes y después de su concentración gravimétrica. Se presenta en la Figura 3.1 el diagrama de la primera parte de la metodología experimental.

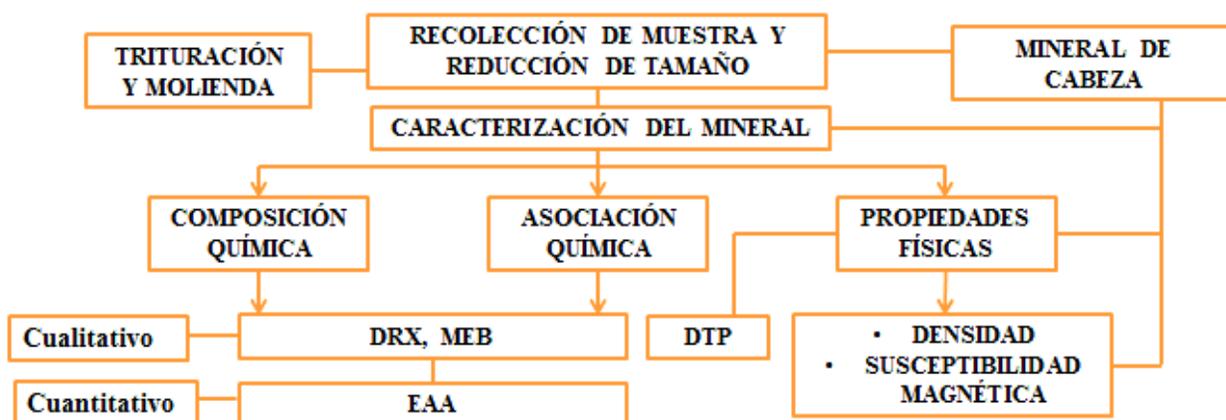


Figura 3. 1 Desarrollo experimental. Primera parte de la experimentación; Caracterización del mineral de cabeza.

3.1 Recolección de muestra.

Para la recolección de las muestras minerales, se visitó el yacimiento ubicado en la comunidad de Nocupétaro, Michoacán. Se recolectaron cuatro muestras identificadas como 106, 107, 108 y 109, en las coordenadas que se presentan en la Tabla 3.1 con la finalidad de obtener muestras representativas de una cierta área del yacimiento.

Tabla 3. 1 Coordenadas de las muestras que fueron tomadas en cuatro diferentes puntos del yacimiento mineral. h significa la altitud geográfica del punto de acuerdo al GPS.

106	San Antonio
	26°38'79"
	21°04'04"
	h= 716 m
107	San Antonio
	26°37'92"
	21°03'87"
	h= 749 m
108	San Antonio
	26°38'43"
	21°03'71"
	h= 746 m
109	San Antonio
	Muestra tomada de varios puntos del terreno (parte más alta)

La Figura 3.2 muestra el mapa representativo de la zona donde muestreados los cuatro puntos para el desarrollo del proyecto presentado.



Figura 3. 2 Mapa de la zona donde se encuentra el yacimiento mineral.

3.2 Trituración y molienda.

La reducción de tamaño de las muestras minerales recolectadas se llevó a cabo manualmente fracturando las rocas de mayor tamaño hasta un diámetro de partícula promedio de 1 cm. A manera de obtener una porción de muestra (500 gramos aproximadamente) representativa del total de mineral recolectado en cada punto del yacimiento, cada muestra triturada se homogeneizó y se cuarteó por separado, tomando dos porciones de los extremos, como se muestra en la Figura 3.3 quedando disponibles dos cuartos, los cuales nuevamente se homogeneizaron y cuartearon, esta operación se repitió hasta obtener muestras totalmente homogéneas y de 500 gramos cada una para tener suficiente mineral para realizar los experimentos siguientes.

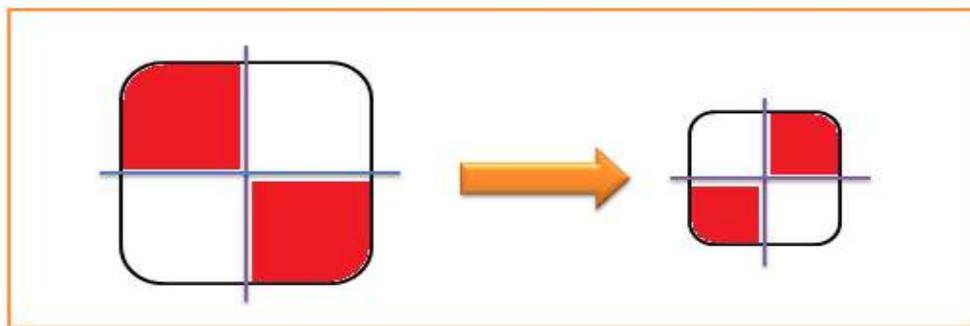


Figura 3. 3 Esquema representativo de la operación de cuarteado de las muestras minerales.

De los 500 gramos obtenidos en cada punto en la etapa anterior, nuevamente se cuartearon hasta obtener 30 gramos de mineral para pulverizarlo durante 1 minuto aproximadamente. La pulverización se realizó en un pulverizador de discos marca Bico Denver ubicado en el laboratorio de procesamiento de minerales. El tiempo de pulverización se varió de acuerdo a la distribución de tamaño de partícula que garantizó la liberación de las especies de valor.

3.3 Caracterización química y física del mineral de cabeza.

El mineral de estudio fue caracterizado química y físicamente mediante análisis cualitativos y cuantitativos para identificar las especies minerales que componen las rocas, así como el contenido en las mismas de los elementos de valor como oro, plata y posiblemente platino, cobre, etc. A continuación se describe la metodología empleada para la caracterización del mineral de cabeza.

3.3.1 Análisis químico cualitativo.

Se realizó el análisis químico cualitativo a 1 g de cada uno de los cuatro puntos de recolección del mineral para determinar la asociación química correspondiente a cada muestra. La caracterización química cualitativa se llevó a cabo con ayuda de un difractograma de rayos X marca Bruker DaVinci Advance, Modelo D8. Los parámetros utilizados fueron:

Voltaje: 40 Kv – 40 Ma.

Rango: 5.000° -85.008°

Tiempo: 0.3 segundos.

Incremento de paso: 0.020°

Las partículas pulverizadas se analizaron semi cuantitativamente mediante la técnica de EDS del microscópico electrónico de barrido (MEB) marca Jeol, modelo 5910. La finalidad de este análisis fue identificar elementos químicos de valor comercial [38].

3.3.2 Análisis químico cuantitativo.

El análisis químico cuantitativo de las muestras minerales se realizó por la ruta digestión con agua regia y asistida por horno de microondas, seguida por la cuantificación del elemento de interés mediante espectrofotometría de absorción atómica. Cada análisis se llevó a cabo por triplicado; el resultado reportado es el promedio de estas réplicas.

Se pesaron 0.5 g de muestra mineral en una balanza analítica, para cada uno de los 4 puntos que se muestrearon, esta masa de mineral se colocó en vasos de teflón para horno de microondas y se adicionaron 12 mL de agua regia, que está formada por 9 mL de HCl + 3 mL de HNO₃.

El horno de microondas utilizado es marca Perkin Elmer Modelo Titan MPS con control de temperatura y presión. Los parámetros establecidos con los que se llevó a cabo la digestión de las muestras minerales en el horno de microondas se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2 Variables utilizadas en el horno de microondas para la digestión de las muestras minerales.

Método: ROCA METAMÓRFICA (modif.)					
	T [°C]	P [bar] del recipiente	Rampa de calentamiento (°C/min)	Sostén (Tiempo de permanencia)	P [%]
1	150	25	5	10	25
2	200	28	2	15	50
3	170	30	5	5	30
4	50	30	1	10	0

Una vez realizada la digestión con agua regia de las muestras minerales, las tres réplicas se juntaron para hacer una sola muestra homogénea representativa de cada punto, se filtraron con ayuda de papel poroso para eliminar los posibles residuos de mineral que no se hayan digerido y el medio acuoso resultante se aforó a 100 mL con agua destilada. Por último, se continuó con la cuantificación del medio acuoso mediante el Espectrómetro de Absorción Atómica Modelo Perkin Elmer PinAAcle 900 H.

Con soluciones de concentración conocida se elaboraron patrones para construir las curvas de calibración correspondientes al elemento a detectar por el espectrofotómetro. Los estándares utilizados son certificados de acuerdo al proveedor Perkin Elmer Pure con 1000 mg/L de Au y 10% HCl. Los 5 estándares para elaborar la curva de calibración, se prepararon con 1, 2, 3, 4 y 5 partes por millón (ppm) de oro, esto en base a la concentración esperada de este elemento en el analito.

3.3.3 Distribución de tamaño de partícula.

La distribución del tamaño de partícula obtenido a determinado tiempo de pulverización se realizó con ayuda de un analizador de tamaño de partícula por difracción laser marca Coulter modelo LS 100. Para realizar la medición se necesitaron al menos 10 gramos de muestra previamente deshumidificada en una mufla marca Yimboshi modelo BX-10-12 para evitar aglomeración de la muestra. Se colocó dentro de la mufla durante 30 minutos a una temperatura de 110 °C.

3.3.4 Determinación de la densidad.

Para el cálculo de la densidad del mineral de cabeza de las cuatro muestras pulverizadas durante 1 minuto, se utilizó un picnómetro marca Brand de 25 cm³, de acuerdo a la norma ASTM D-854 [39] siguiendo el procedimiento que se describe a continuación.

- 1.- Pesar el picnómetro vacío (W_1).
- 2.- Pesar el picnómetro lleno con agua destilada (W_2).
- 3.- Pesar el picnómetro vacío más la muestra mineral dentro del picnómetro (W_3).
- 4.- Pesar el picnómetro lleno con agua destilada y la muestra mineral dentro (W_4).

Para conocer el volumen desplazado por la muestra mineral dentro del picnómetro se realiza el siguiente cálculo:

$$\text{Volumen} = W_2 - W_4 - W_1 \quad (3.1)$$

La masa mineral se calcula:

$$\text{Masa} = W_3 - W_1 \quad (3.2)$$

Los valores obtenidos de los cálculos anteriores se sustituyen en la fórmula de la densidad:

$$\rho = \frac{w}{v} \quad (3.3)$$

3.3.5 Susceptibilidad magnética.

Una vez identificadas las fases minerales mediante DRX, se consultó la bibliografía correspondiente sobre los valores de susceptibilidad magnética de cada una de dichas especies minerales en las muestras de mineral de cabeza.

La Figura 3.4 muestra el diagrama de la segunda etapa de la experimentación, la cual comprende la prueba de liberación modificando el tiempo de molienda del mineral, la clasificación de las partículas por tamaño y su posterior análisis químico cuantitativo, así como la caracterización química y física del concentrado obtenido en la etapa de beneficio del mineral.

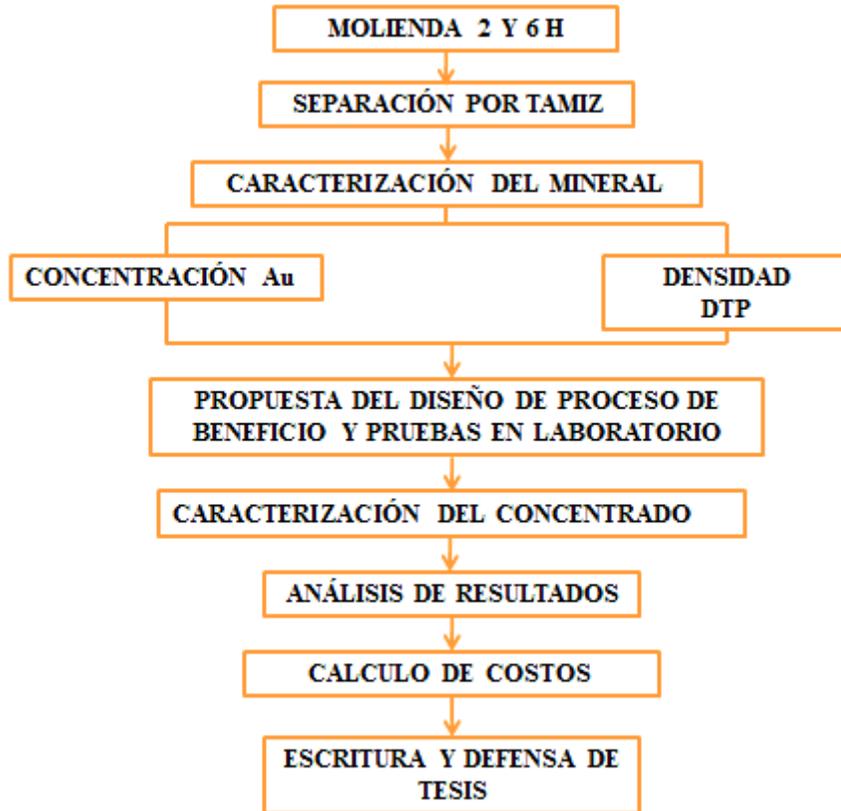


Figura 3. 4 Segunda etapa del desarrollo experimental. Beneficio del mineral aurífero.

3.4 Reducción de tamaño de partícula a 2 y 6 horas de molienda.

Se realizó la reducción de tamaño de partícula del mineral triturado utilizando un molino de bolas de laboratorio. Se varió el tiempo de molienda para obtener diversas distribuciones de tamaño, cada una con su correspondiente d_{80} (80% del mineral molido con tamaño de partícula menor a determinado diámetro equivalente). El objetivo de esta etapa es establecer el tamaño de partícula donde las especies auríferas o en su caso el oro libre queda expuesto para su posterior concentración o separación.

En cada operación de molienda se colocaron 500 g de muestra en el molino de bolas, el tiempo de permanencia en el molino se estableció en 2 y 6 horas.

3.5 Caracterización física y química de muestras por rango de tamaños.

Para cada tiempo de molienda se recolectaron muestras de 100 g aproximadamente y se tamizaron empleando las mallas 80, 100, 150, 270 y -270 (serie Tayler) durante 20 minutos. Se recolectó el mineral retenido en cada una de las mallas y se seleccionaron los tamaños grueso (malla 80 = 177 μm), medio (malla 150 = 105 μm) y fino (<malla 270 = <53 μm) para su posterior caracterización.

3.5.1 Análisis químico cualitativo.

Nuevamente se realizó el análisis químico cualitativo con la finalidad de relacionar el grado de liberación con el contenido de oro en cada rango de tamaño de partículas e incluso para determinar la posible exposición de nuevas fases mineralógicas. El procedimiento anteriormente descrito se aplicó al mineral de cabeza y para los dos tiempos de molienda experimentados.

3.5.2 Análisis químico cuantitativo.

Se realizó análisis químico cuantitativo a las muestras recolectadas en cada una de las mallas que se seleccionaron con el objetivo de conocer el tamaño de partícula y tiempo de molienda donde se obtenía la mayor concentración de oro en el mineral procesado.

La cuantificación de Au se hizo para cada tamaño de partícula retenidos en las mallas durante el tamizado; el procedimiento que se empleó para la preparación de las muestras a analizar fue el que se describió anteriormente para el análisis químico cuantitativo por espectroscopia de absorción atómica del mineral de cabeza.

3.5.3 Densidad

La densidad para la clasificación del tamaño de partículas a 2 y 6 horas de molienda, se determinó siguiendo el mismo procedimiento descrito para el mineral de cabeza.

3.5.4 Distribución de tamaño de partícula.

Se determinó la distribución de tamaño de partícula para cada rango de tamaños y tiempos de molienda y pulverizado, de acuerdo a la información aportada por el equipo Coulter descrito en párrafos anteriores.

3.6 Propuesta del diseño de proceso de beneficio del mineral.

Conocido el tamaño de partícula al cual la mayor parte de las partículas de valor están liberadas, así como las especies minerales presentes en el mineral y la concentración de oro contenido tanto en el mineral de cabeza como en los diferentes tamaños de partícula, se está en condición de proponer un diseño para su proceso de beneficio, el cual será descrito a continuación.

Aplicando la ecuación (2.4) referida en el apartado de la revisión bibliográfica para calcular la facilidad de concentración (FC) del mineral aurífero por métodos gravimétricos, se pudo corroborar si el beneficio del mineral por este medio sería factible tanto técnica como económicamente.

3.7 Beneficio del mineral por elutriación.

Se utilizó un elutriador a nivel laboratorio, que es un separador gravimétrico cuyo principio de funcionamiento es igual a los separadores gravimétricos utilizados en la industria como, por ejemplo, el equipo Falcon. En este separador las partículas con gravedad específica mayor, en este caso las partículas de Au, son separadas por acción de la fuerza de gravedad de las partículas con gravedad específica menor y pasan a formar parte de las colas o desechos, obteniendo de esta forma el concentrado. La Figura 3.5 presenta una imagen del elutriador vertical utilizado para concentrar el mineral objeto de la presente investigación.

El elutriador consta de una serie de tubos con diámetros diferentes, de manera tal que al alimentar aire comprimido al depósito de mineral seco que forma parte del mismo elutriador, forza al mineral a pasar por cada tubo del mismo. Debido a los diámetros diferentes de los tubos es posible variar la velocidad superficial en cada uno de ellos, fenómeno que permite la clasificación o separación de las partículas de acuerdo a su respuesta a la fuerza de gravedad. De lo anterior, se

espera que las partículas más pesadas o con gravedad específica mayor, sean retenidas en el tubo de menor diámetro y que las partículas más ligeras o con menor gravedad específica se queden en el tubo con mayor diámetro o pasen directamente a formar parte de los desechos o colas.

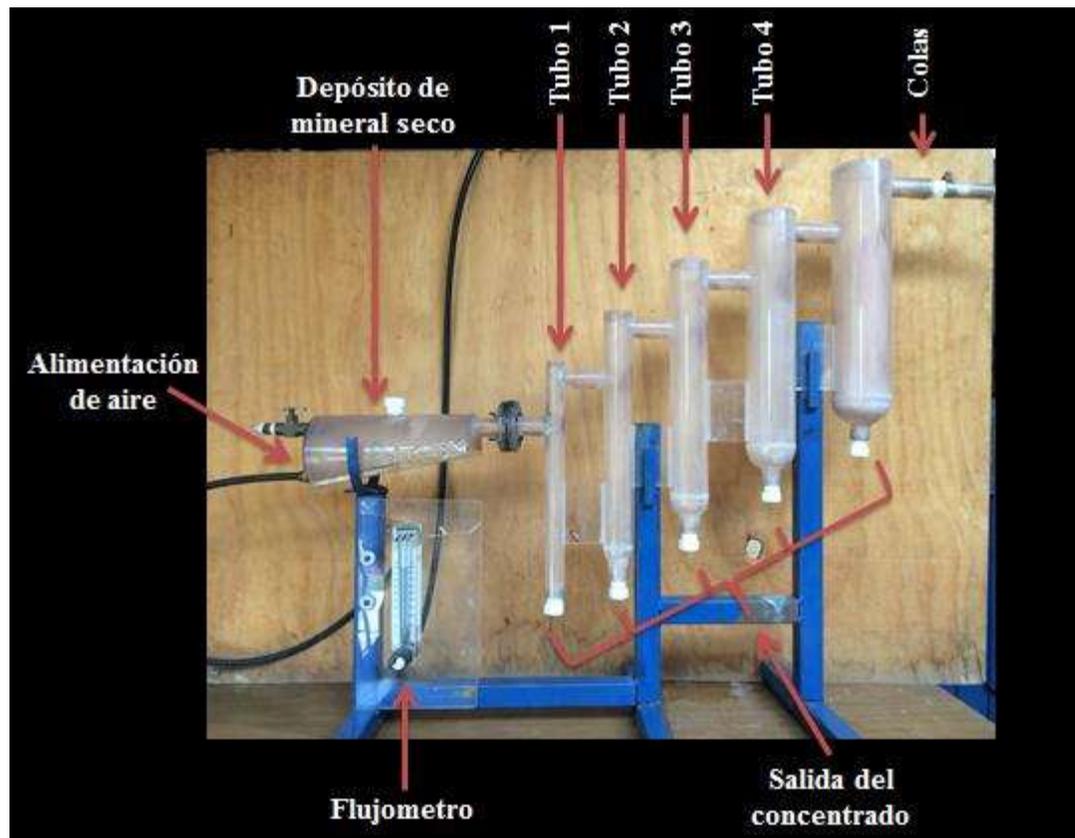


Figura 3. 5 Elutriador vertical utilizado para la concentración de las muestras minerales estudiadas.

Como pruebas preliminares, el elutriador fue operado a diferentes inyecciones de flujo de aire para encontrar el flujo adecuado al cual se podría concentrar la mayor cantidad posible de partículas de valor liberadas.

Se decidió concentrar la muestra 106 debido a que las muestras 107, 108 y 109 se agotaron con la caracterización realizada previamente. Del análisis químico cualitativo y cuantitativo se observó que el yacimiento mineral presenta las mismas especies minerales, por lo tanto los mismos

elementos químicos y la concentración de Au aumenta en la muestra 108, por lo que ésta será analizada posteriormente más a detalle.

Para la prueba de concentración, se colocaron en el elutriador vertical 100 gramos de la muestra mineral 106 pulverizada para establecer la factibilidad de aplicación de la separación gravimétrica y la distribución de las partículas de valor a diferentes tamaños o diferente gravedad específica. Se le inyectó un flujo de aire de 60 L/min durante 40 minutos. La muestra mineral se distribuyó entre los tubos verticales del elutriador y se tuvo como resultado una separación heterogénea respecto a la distribución de tamaños de partícula obtenidos en la nueva etapa de molienda durante una hora. Las colas correspondientes a esta etapa, fueron captadas en un recipiente con agua para prevenir pérdidas en el ambiente.

3.7.1 Caracterización del concentrado obtenido por elutriación.

La muestra distribuida entre los tubos y las colas se recolectaron para su posterior análisis. A cada uno de los tubos se le realizó análisis químico cuantitativo para conocer la concentración de Au en cada uno de los tubos y en las colas. La metodología empleada para la preparación de las muestras y su posterior cuantificación, fue la misma que se describió anteriormente para el análisis del mineral de cabeza por espectroscopia de absorción atómica.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Mineral de cabeza.

Para el desarrollo del proyecto de investigación reportado, se inició con la recolección de muestras en el yacimiento mineral, se tomaron cuatro muestras de diferentes puntos del yacimiento. A continuación se reportan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la experimentación.

4.2 Resultados de la caracterización química y física del mineral de cabeza.

Una vez triturado y molido el mineral de cabeza, se prosiguió a la caracterización química y física de éste para tener conocimiento sobre las especies mineralógicas presentes, así como el contenido de metales preciosos, la densidad y la distribución de tamaño de partícula obtenido después de la etapa de pulverización. Los resultados obtenidos para la etapa de la caracterización de las muestras minerales se presentan a continuación.

4.2.1 Análisis químico cualitativo por difracción de rayos X (DRX).

El análisis químico por difracción de rayos X reveló las especies mineralógicas presentes en las cuatro muestras minerales. Los resultados observados en los difractogramas se presentan en la Figura 4.1. Se observa que las especies minerales que se encuentran en mayor proporción en cada uno de los cuatro puntos muestreados son cuarzo (SiO_2), andesita ($\text{Al}_{0.735}$, $\text{Ca}_{0.24}$, $\text{Na}_{0.26}$, O_4 , $\text{Si}_{1.265}$), anortita ($\text{Al}_{1.52}$, $\text{Ca}_{0.52}$, $\text{Na}_{0.48}$, O_8 , $\text{Si}_{2.48}$), albita (Al , Na , O_8 , Si_3), calcita (Ca , C , O_3), hematita (Fe_2 , O_3) y laumontita (Al_2 , Ca , H_{14} , $\text{O}_{15.522}$, Si_4), variando algunas en la intensidad con que se muestran los picos, es decir, en algunos puntos existe mayor cantidad de la especie mineral observada mientras que en otros es más evidente la existencia de otra especie.

Tal y como se menciona el Consejo de Recursos Minerales [11], la región de tierra caliente, en Michoacán, se ha caracterizado por que las principales rocas encajonantes de los yacimientos son de tipo andesíticas, es por esta razón que las principales especies minerales que se encuentran en las muestras analizadas son las que se observaron en el espectro de difracción de rayos X. Debido

a la sensibilidad del instrumento de análisis cualitativo, no se detectaron especies auríferas o asociaciones con plata. Tampoco se detectaron especies minerales que incluyeran cobre.

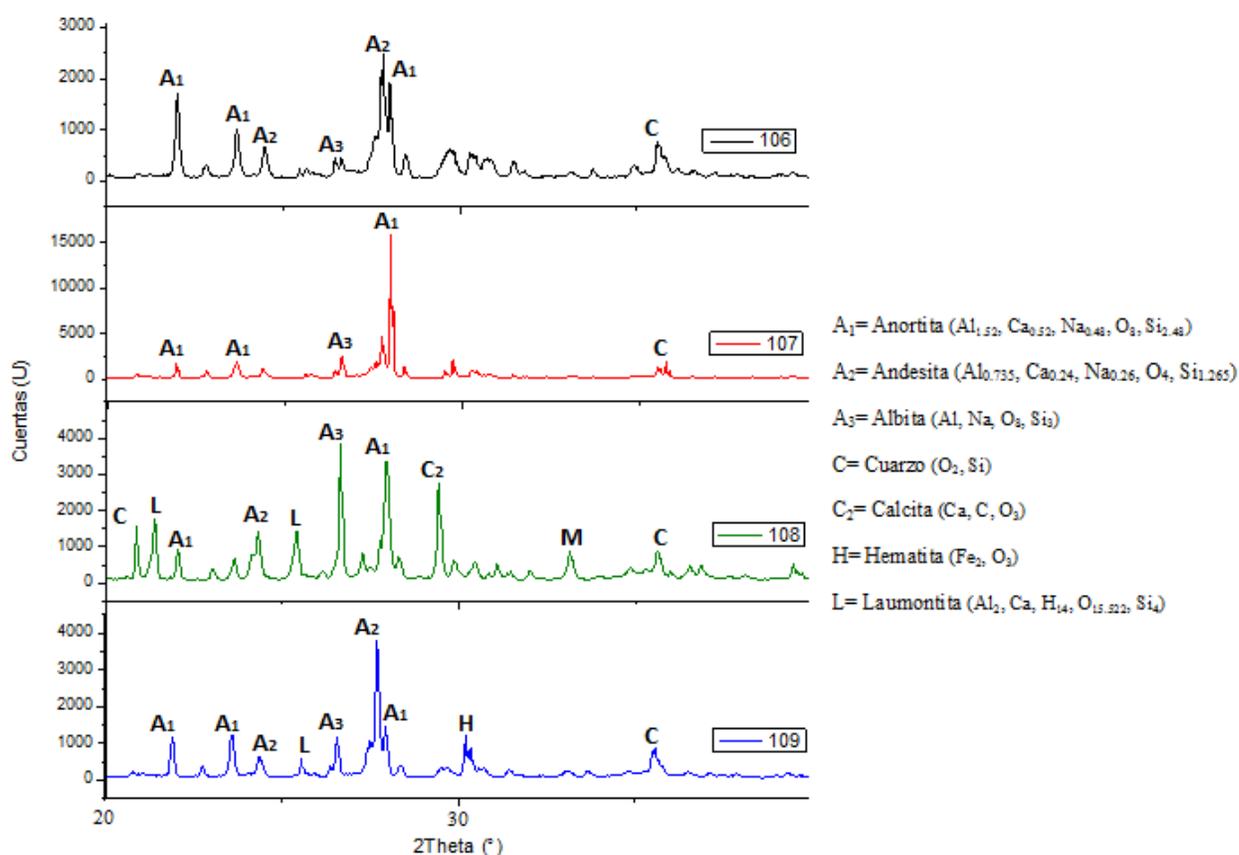


Figura 4. 1 Difractograma comparativo del mineral de cabeza para las muestras 106, 107, 108 y 109.

4.2.2 Análisis químico cualitativo por microscopía electrónica de barrido (MEB).

Por su parte, el microanálisis por EDS realizado a las 4 muestras del mineral de cabeza se resume en la Tabla 4.1. En dichos análisis se puede apreciar contenidos de oxígeno (O), silicio (Si), calcio (Ca), hierro (Fe), magnesio (Mg) y en algunos casos titanio (Ti) y sodio (Na).

Tabla 4. 1 Elementos presentes en las cuatro muestras de mineral de cabeza.

Muestra	106	107	108	109
Elemento	wt.%	wt.%	wt.%	wt.%
Oxígeno	40.27	39.85	39.32	43.34
Silicio	8.9	7.64	9.87	9.28
Aluminio	1.05	2.43	3.76	3.95
Calcio	4.41	3.85	2.18	2.12
Hierro	8.59	8.45	16.66	9.22
Magnesio	2.5	1.22	0.24	1.48
Titanio	0.55	0	0	0
Sodio	0	12.25	0	0

En la tabla anterior se puede apreciar que el elemento químico que se encuentra en mayor proporción en peso para cada una de las cuatro muestras es el silicio y oxígeno, elementos constituyentes de la anortita y la andesita, es decir, las especies minerales que se encuentran en mayor proporción en las muestras observadas en los difractogramas obtenidos por difracción de rayos X.

Otro elemento que se aprecia en el análisis químico es el hierro y como se menciona en la bibliografía, la mayoría de los silicatos tienen uno o más elementos adicionales, por lo que podría tratarse de un silicato ferromagnesiano [40]. De igual forma, en el análisis se puede observar pequeñas cantidades de calcio, aluminio y en menor proporción magnesio, nótese que solo en la muestra 107 se tiene presencia de sodio y en la muestra 106 de titanio. Cabe señalar que el análisis químico por EDS en microscopía electrónica de barrido es un microanálisis puntual, por lo que se puede asumir que los resultados obtenidos para cada muestra corresponden solo a

ciertas partículas que fueron analizadas, pudiendo variar los contenidos de estos elementos en otras partículas.

En la Figura 4.2 se presenta el mapeo tomado para cada una de las cuatro muestras del mineral de cabeza, dichos mapeos corresponden a las zonas donde se llevó a cabo el análisis químico por EDS que se presentó en las gráficas anteriores. En las cuatro imágenes presentadas se puede observar que los tamaños de partículas varían en cada una de las muestras, siendo las partículas de la muestra 108 las más pequeñas respecto a las muestras 106, 107 y 109. La diferencia en el tamaño de partículas de las cuatro muestras, se puede atribuir a las especies minerales que se encuentran en mayor proporción en cada uno de los puntos del yacimiento que fueron muestreados, las cuales pueden presentar diferentes dureza [24].

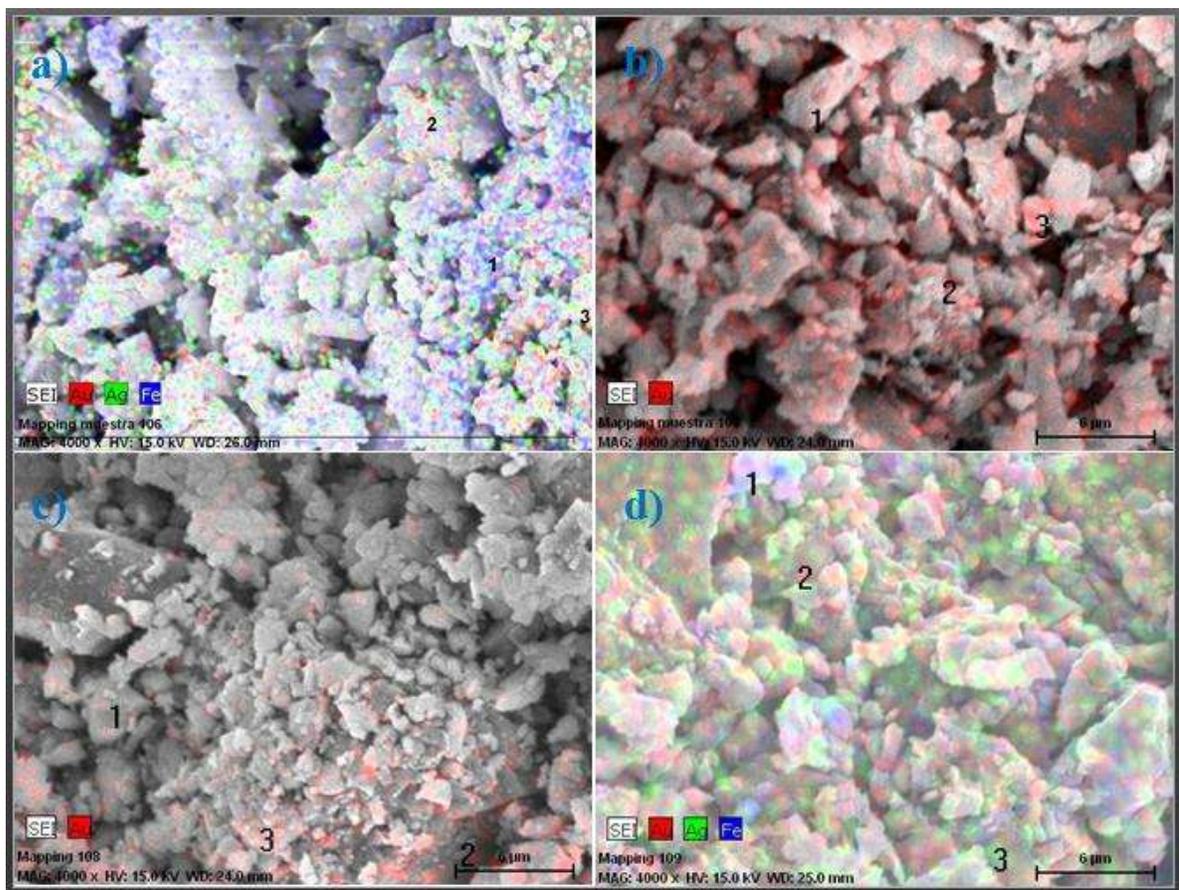


Figura 4. 2 Mapeos realizados al mineral de cabeza por microscopía electrónica de barrido. a) Muestras 106, b) Muestra 107, c) Muestras 108 y d) Muestra 109.

Los resultados obtenidos en el análisis químico por microscopía electrónica de barrido, pertenecen a elementos que se presentaron en la muestra con un porcentaje en masa mayor al 1%, por tal motivo resulta complicado observar la presencia del elemento de valor Au ya que éste podría encontrarse en el orden de partes por millón, en este caso sería de mayor utilidad emplear una técnica de análisis químico cuantitativo si se desea conocer su contenido exacto en las muestras minerales.

4.2.3 Análisis químico cuantitativo.

Los resultados obtenidos para la concentración de Au en el mineral de cabeza de cada una de las cuatro muestras analizadas, por la ruta disolución con agua regia – cuantificación por espectroscopia de absorción atómica, se resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4. 2 Resultados para la cuantificación de Au por espectroscopia de absorción atómica.

Muestra	[Au] (g/ton)
106	8.66
107	8.66
108	13.99
109	8.66

En la Tabla 4.3 se observa que las muestras 106, 107 y 109 presentan la misma concentración de Au mientras que para la muestra 108 se presentó una mayor concentración de oro. Como se notará en los siguientes párrafos, la muestra con mayor contenido de oro preferentemente se utilizó para caracterizarla y realizar los procedimientos de concentración.

4.2.4 Densidad.

Los valores calculados a partir de datos experimentales para la determinación de la densidad de las muestras de mineral de cabeza, se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4. 3 Densidad del mineral de cabeza.

Muestra	Densidad ($\frac{g}{cm^3}$)
106	2.83
107	2.62
108	2.86
109	3.04

En la Tabla 4.3 se puede observar que la densidad para la muestra 109 es mayor, esto probablemente se deba a la presencia de la fase hematita (Fe_2O_3) en esta muestra mineral (densidad de $5.26 g/cm^3$). Nótese que la densidad de la hematita es considerablemente mayor en comparación con las otras especies minerales presentes en la muestra que va de los 2 a los $3.8 g/cm^3$ [24], lo que justifica que la densidad sea mayor en las muestras 109 y 108 [24].

Los valores obtenidos para la densidad de las cuatro muestras analizadas demuestran que están relacionados con la ley del mineral y con las especies minerales presentes. Con ayuda del análisis químico cualitativo se sabe que los silicatos son los que se encuentran en mayor proporción en peso en las muestras analizadas y recordando que la densidad de los silicatos va desde los 2.0 hasta los $3.8 g/cm^3$ [24], se puede corroborar la información obtenida por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido y a su vez con los valores obtenidos para la concentración de Au, ya que como se encuentra a baja concentración, la densidad de las muestras no es mayor a la de los silicatos.

4.2.5 Susceptibilidad magnética.

De acuerdo con las especies mineralógicas encontradas con ayuda del análisis químico cualitativo por difracción de rayos X para cada una de las cuatro muestras minerales analizadas, se consultó información sobre la susceptibilidad magnética para cada especie mineral en tablas reportadas en la bibliografía correspondiente [25].

A continuación se presenta un resumen en la Tabla 4.4 de las especies minerales encontradas con sus respectivos valores de susceptibilidad magnética y densidad.

Tabla 4. 4 Especies minerales contenidas en el mineral de estudio y sus respectivos valores de susceptibilidad magnética [25].

Especie mineral	Susceptibilidad magnética relativa	Densidad $\frac{g}{cm^3}$
Andesita	-0.0004	2.69
Anortita	-0.0005	2.77
Montmorillonita	-0.0003	2.0
Cuarzo	-0.0005	2.65
Laumontita	-0.0004	2.3
Albita	-0.0005	2.61
Calcita	-0.0004	2.7
Hematita	0.769	5.26
Bytownita	-0.0004	2.7

De acuerdo a los valores que se resumen en la tabla anterior, se puede observar que sólo la magnetita presenta una susceptibilidad magnética positiva, no obstante, se trata de una especie mineral que se encuentra dentro del grupo denominado como “débilmente magnético” [25] por lo que de ser necesaria la separación por concentración magnética se requerirá de un equipo de alta intensidad.

La especies minerales que se encontraron en las cuatro muestras de mineral de cabeza, no están presentes en proporción en peso adecuado y con susceptibilidad magnética favorable para que pudieran ser separadas por algún método magnético, es decir que esta propiedad física no podría ser aprovechada con el fin de llegar al beneficio del mineral por lo que la concentración magnética para este mineral, no sería factible tanto técnica como económicamente.

4.2.6 Distribución de tamaño de partícula.

Tener conocimiento sobre cuál es el tamaño de partícula al que se pudo llegar procesando las muestras del mineral de cabeza durante 1 minuto es de suma importancia, ya que con estos valores se tendrá idea de la necesidad de moler el mineral a tamaños menores, relacionando dicho tamaño con los resultados obtenidos del análisis químico cualitativo y cuantitativo.

En las Figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 se observa la distribución del tamaño de partícula para cada una de las cuatro muestras de mineral de cabeza analizado y además se especifica el d_{80} (80% del mineral con tamaño menor al diámetro de partícula correspondiente) para cada muestra.

En la Figura 4.3, la cual corresponde a la muestra 106, se puede observar que el d_{80} de las partículas de la muestra de mineral de cabeza procesado durante 1 minuto de molienda presentan un tamaño de 30 μm ; es decir que el 80% del total de las partículas de la muestra mineral analizada presenta un tamaño máximo de 30 μm y este tamaño va disminuyendo como se observa en el gráfico.

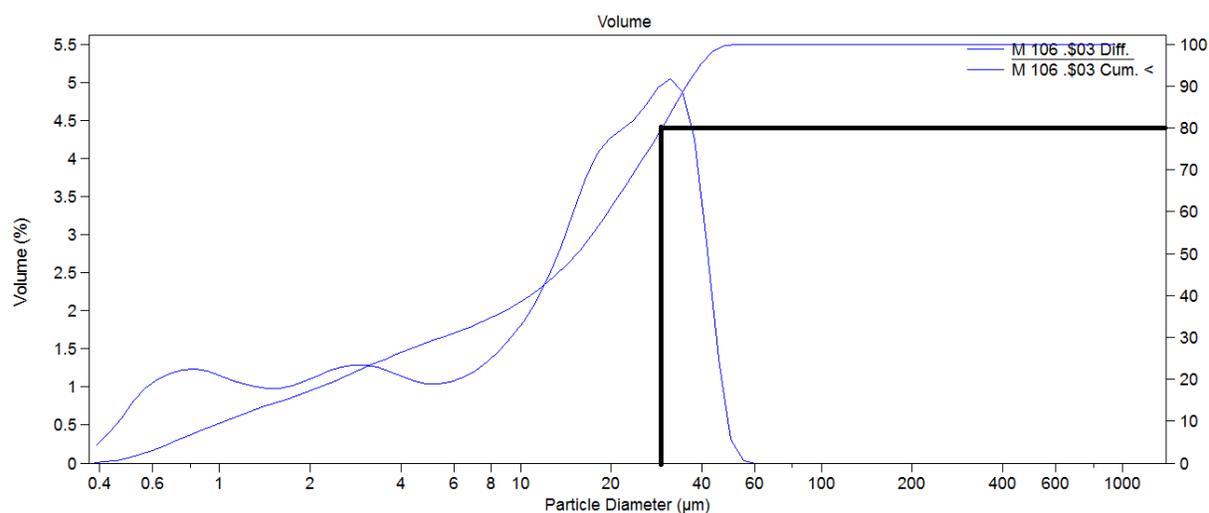


Figura 4. 3 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 106.

De igual manera que para la muestra 106, se analizaron los gráficos obtenidos para las muestras 107, 108 y 109. En la Tabla 4.5 se resume los d_{80} (μm) correspondientes a las cuatro muestras del mineral de cabeza procesado durante 1 minuto en pulverizador de disco. Se aprecia que la muestra 108 presenta un d_{80} menor al resto de las otras muestras analizadas. Esto se relaciona con las especies minerales que se encontraron en esta muestra, destacando que la mayor parte de dichas especies presentan una dureza en la escala de Mohs entre 3 y 2, que corresponde a materiales suaves [24], lo cual hace que la muestra 108 sea blanda y por lo tanto, al momento de la fractura las partículas alcancen un d_{80} menor.

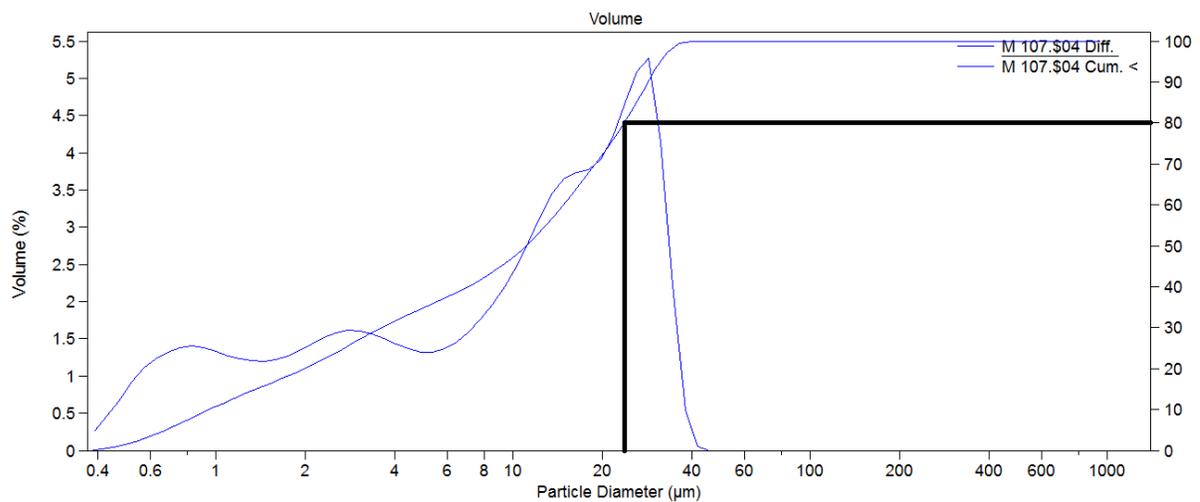


Figura 4. 4 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 107.

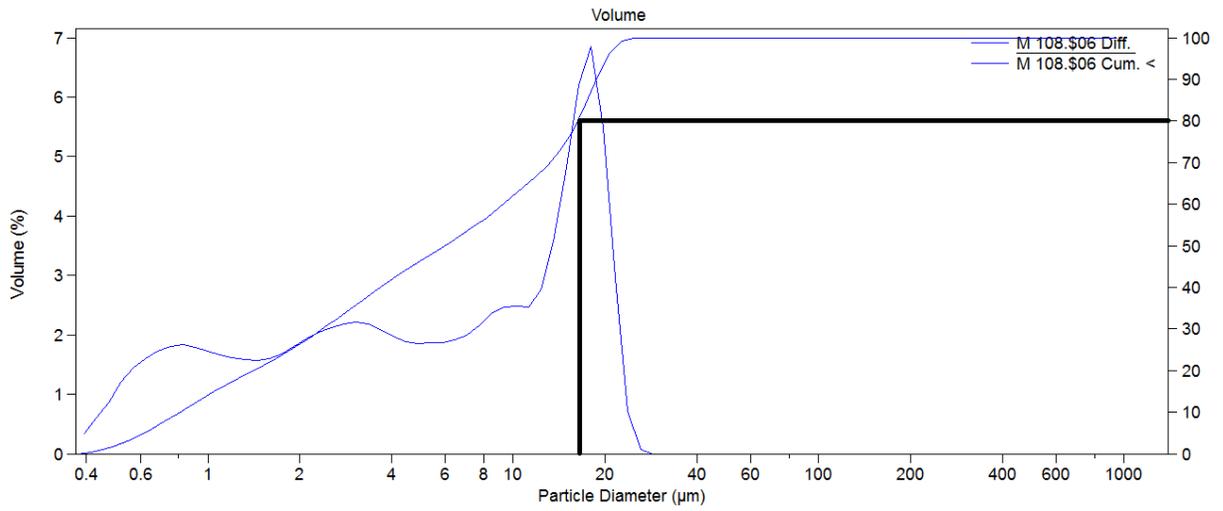


Figura 4. 5 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 108.

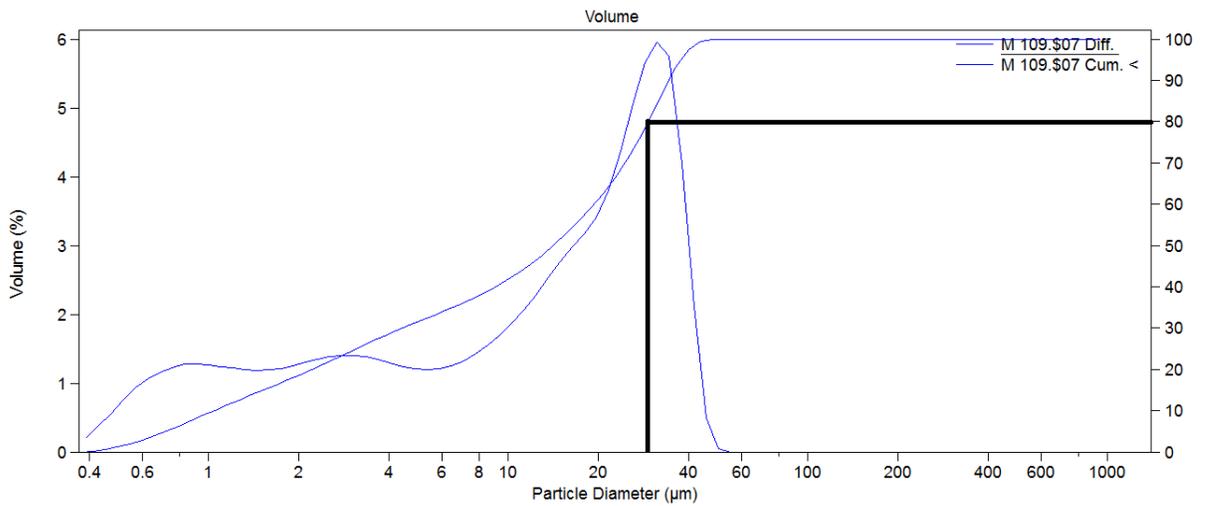


Figura 4. 6 Gráfico de distribución de tamaño de partícula correspondiente a la muestra 109.

Tabla 4. 5 d_{80} correspondiente a las cuatro muestras minerales analizadas.

Muestra	d_{80} (μm)
106	31.5
107	28.7
108	18
109	31.5

4.3 Caracterización química y física del mineral por tiempo de molienda.

Se realizó análisis químico cualitativo para evaluar el grado de liberación al momento de la fractura de las partículas, dando como resultado las mismas especies minerales para los dos diferentes tiempos de molienda (2 y 6 horas) y a su vez, coincidiendo con las especies minerales observadas en las muestras pulverizadas durante 1 minuto en el pulverizador de disco.

4.3.1 Análisis químico cualitativo para 2 horas de molienda.

Para el análisis químico cualitativo por difracción de rayos X se seleccionaron los tamaños de partícula grueso y fino con el objetivo de encontrar si a menor tamaño de partícula y mayor tiempo de molienda se presentaban nuevas especies minerales liberadas. Las imágenes de los difractogramas correspondientes a partículas gruesas (malla 80 = 177 μm) y finas (malla <270 = <53 μm) de la muestra 106 se presentan a continuación en la Figura 4.7.

De igual manera se presentan los difractogramas correspondientes a los tamaños de partícula gruesas (malla 80 = 177 μm) y finas (malla <270 = <53 μm) de las muestras 107 (Figura 4.8), 108 (Figura 4.9) y 109 (Figura 4.10).

En la Figura 4.7 se puede observar que los elementos que conforman las especies minerales son los mismos, siendo silicio, calcio, oxígeno, aluminio y sodio los que se encuentran en mayor proporción, sin embargo, en esta muestra existe la presencia en menor cantidad de la hematita, la cual se encuentra conformada por hierro y oxígeno.

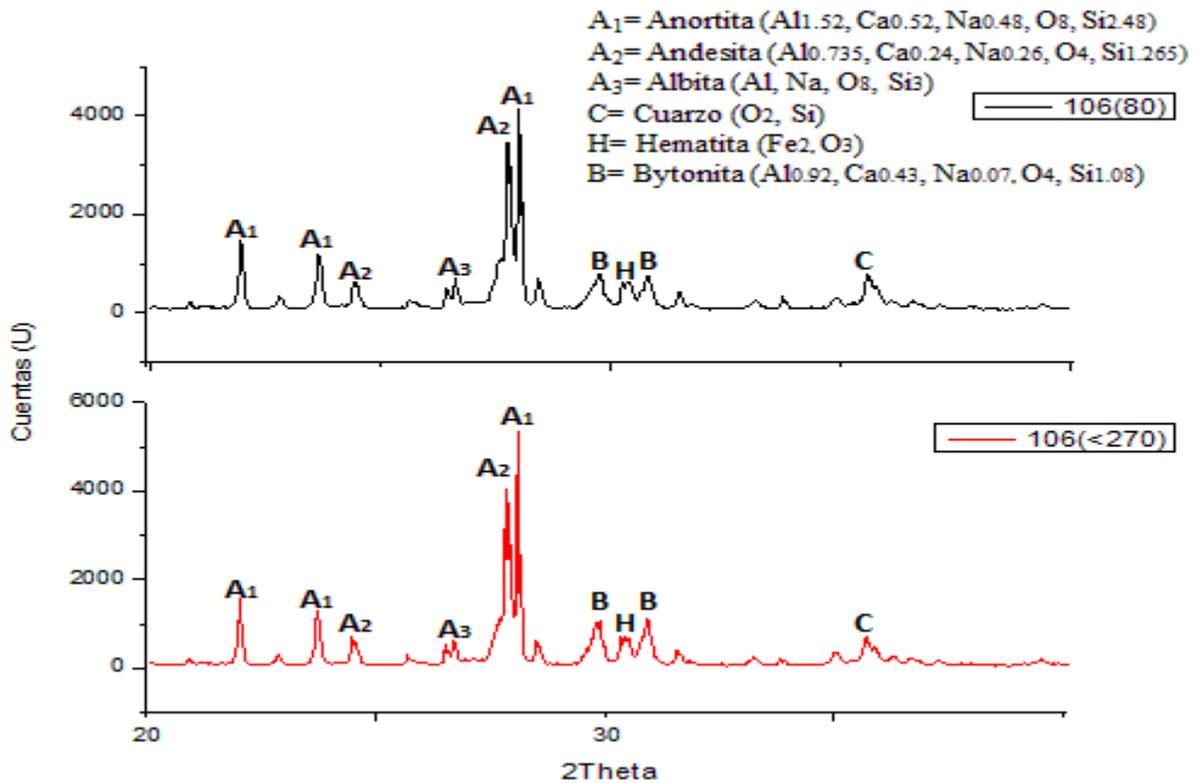


Figura 4. 7 Difractograma de la muestra 106 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.

En la Figura 4.8 se puede concluir que existe la presencia de las mismas especies minerales que las observadas para la muestra 106 a los dos tamaños de partícula analizados, de igual forma los elementos químicos que conforman esta muestra mineral son: silicio, calcio, oxígeno, aluminio, hierro y sodio

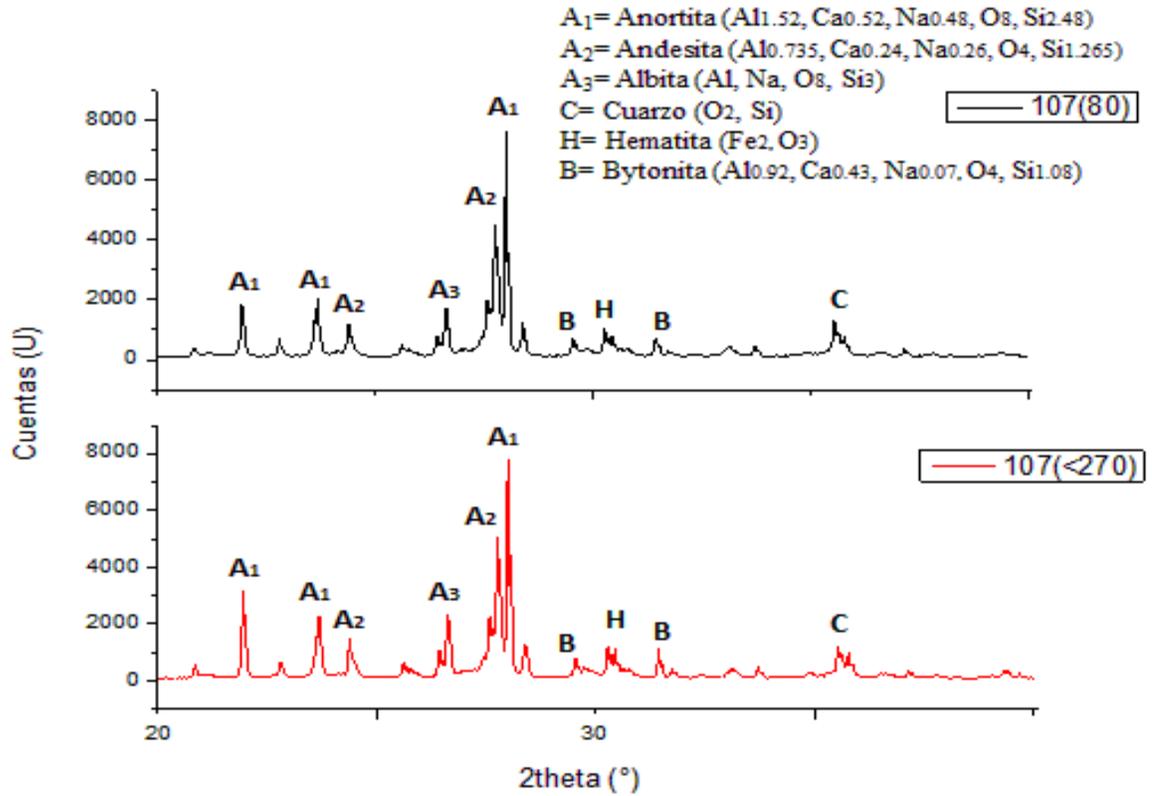


Figura 4. 8 Difractograma de la muestra 107 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.

En la Figura 4.9 se puede observar que en la muestra 108 siguen apareciendo las mismas especies minerales que se encontraron en las muestra 106 y 107, además, en la 108 se presentan tres nuevas especies: calcita, laumontita y montmorillonita; obsérvese que los elementos que componen estas tres especies son silicio, oxígeno, aluminio y carbono, al igual que en las otras especies que se presentaron en las muestras anteriores y solo cambia su relación estequiométrica. No se observó Bytownita en esta muestra analizada.

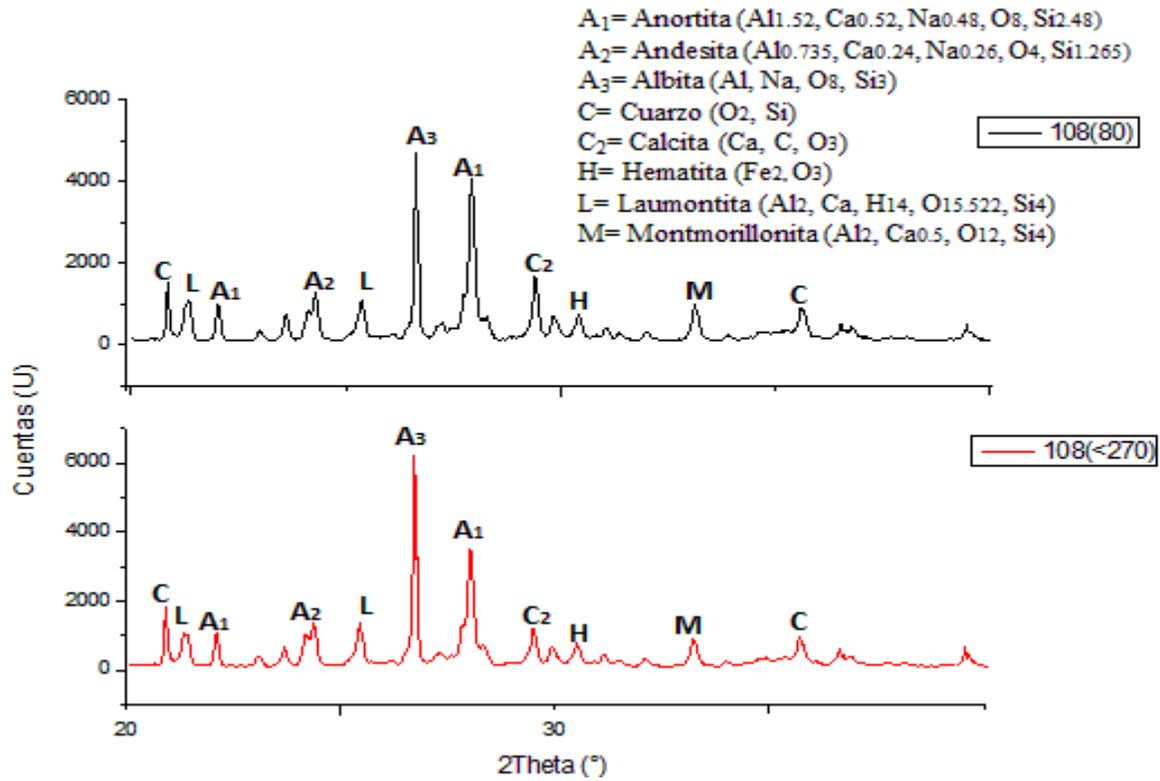


Figura 4. 9 Difractograma de la muestra 108 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.

Por último, en la Figura 4.10, la cual corresponde a la muestra 109 para los dos tamaños de partícula, se pueden apreciar las mismas especies mineralógicas obtenidas para las muestras 106 y 107 más la laumontita.

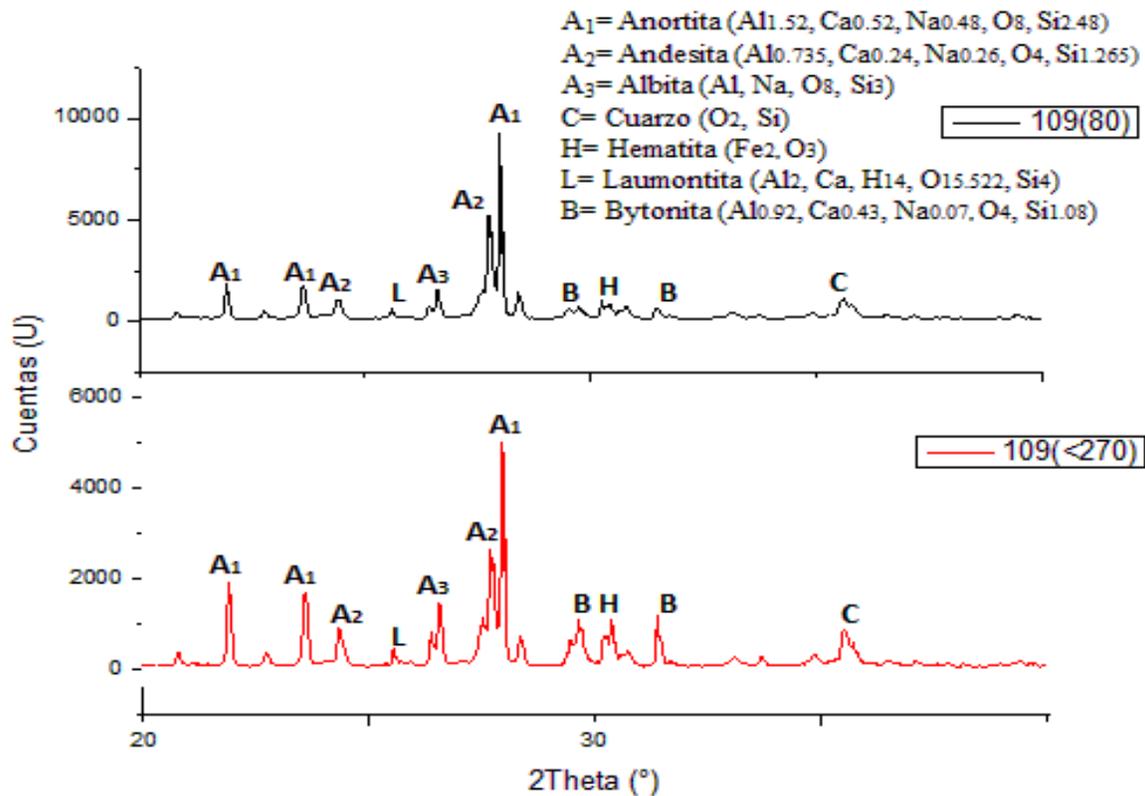


Figura 4. 10 Difractograma de la muestra 109 para las mallas 80 y <270 a 2 horas de molienda en molino de bolas.

De los difractogramas obtenidos para los dos tamaños de partícula de las muestra 106, 107, 108 y 109 se puede concluir que las especies mineralógicas observadas contienen los mismos elementos químicos, siendo la hematita con contenido de hierro, la única especie mineral diferente y la cuál podría influir en los valores obtenidos para el cálculo de la densidad de las muestras.

Con ayuda de los difractogramas anteriores y de los difractogramas obtenidos para las muestras pulverizadas durante 1 minuto, se tomó la decisión de no realizar análisis químico cualitativo a las muestras procesadas durante 6 horas, ya que se tenía la certeza de que se observarían las mismas especies minerales debido a que la composición química de cada una de ellas contienen los mismos elementos, variando solo la intensidad en la que se presentan de una muestra, es decir, dependiendo del punto muestreado del yacimiento.

4.3.2 Densidad del tamaño de partícula grueso, medio y fino para 2 horas de molienda.

En la Figura 4.11 se presentan las densidades estimadas para los tamaños de partícula estudiados.

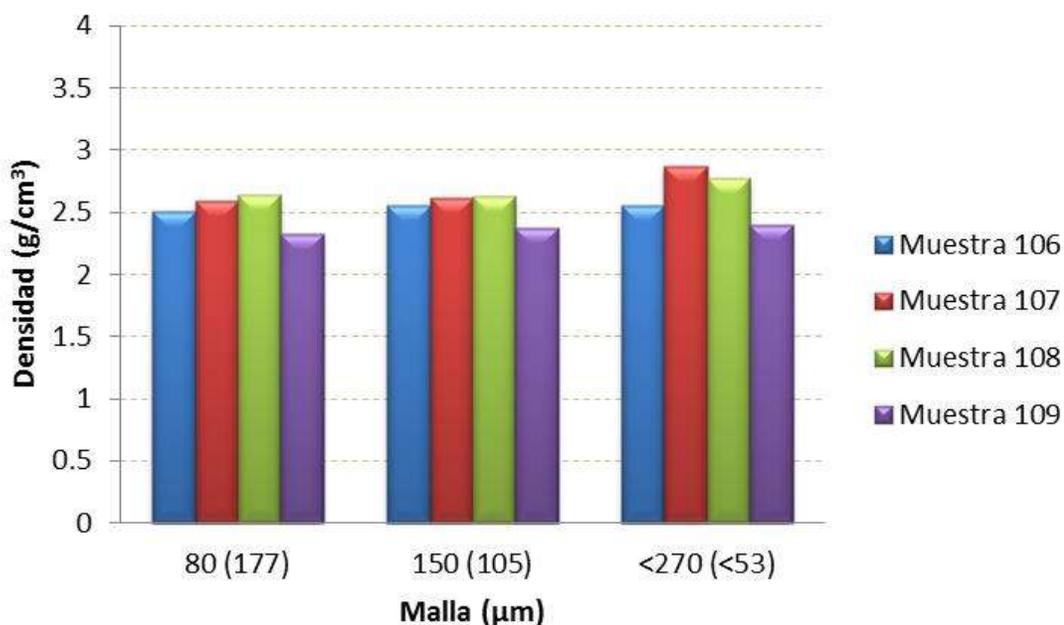


Figura 4. 11 Densidad calculada para las cuatro muestras estudiadas durante 2 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80} .

De la figura anterior se puede resaltar que la densidad del mineral aumenta a partir de tamaños de partícula mayores a 100 μm , esto se debe principalmente a que a estos tamaños las partículas de oro quedan expuestas, elevando así la densidad de las muestras minerales.

4.3.3 Densidad del tamaño de partícula grueso, medio y fino para 6 horas de molienda.

Se determinó la densidad a los tres tamaños de partícula obtenidos a 6 horas de molienda. Los resultados obtenidos en la determinación de la densidad de cada una de las cuatro muestras se presentan en la Figura 4.12.

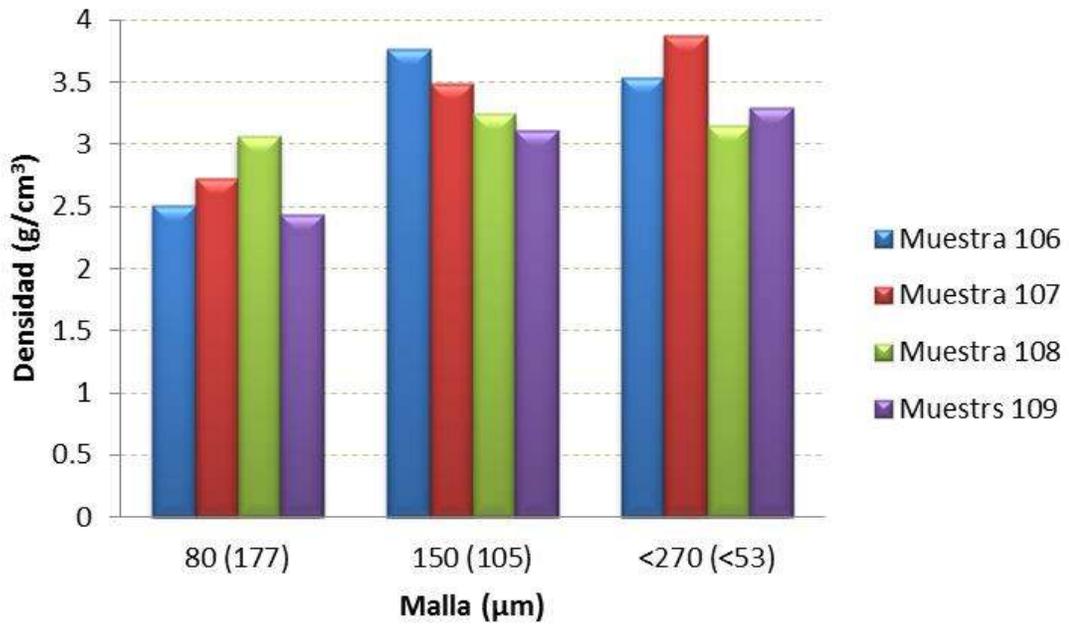


Figura 4. 12 Densidad calculada para las cuatro muestras estudiadas durante 6 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80} .

De los valores correspondientes a la densidad para cada tamaño de partícula analizado, se puede constatar que la densidad es mayor a partir de tamaños de partícula mayores a los 100 µm como se observó en el caso de la determinación de la densidad para 2 horas de molienda, aunque para el caso de 6 horas de molienda la densidad aumenta ligeramente, esto posiblemente se atribuye al hecho de que a estos tamaños de fractura y debido a que se encontró expuesto a mayor tiempo de molienda, se pudo obtener mayor liberación de partículas de oro y posiblemente hematita.

En las Figuras 4.13, 4.14, 4.15 y 4.16 se presentan las gráficas comparativas de la densidad a 2 y 6 horas de molienda para cada una de las 4 muestras y sus respectivos tamaños de partícula estudiados.

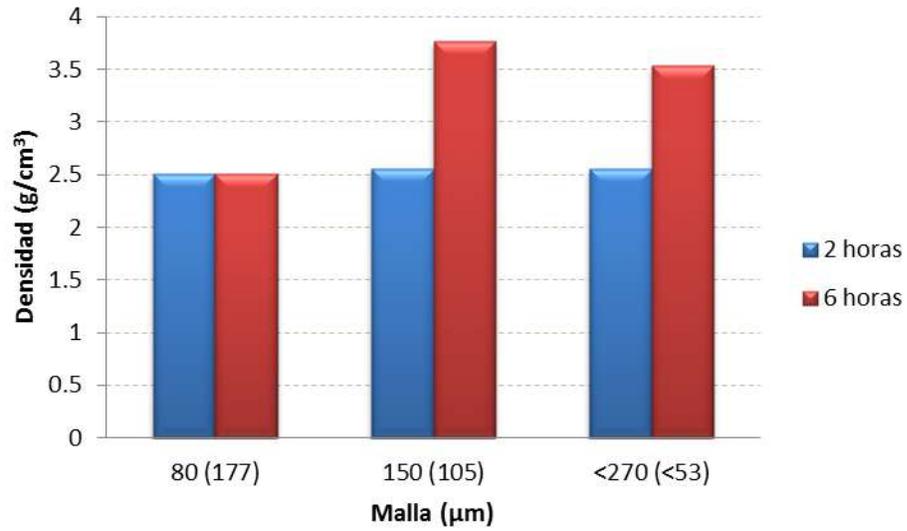


Figura 4. 13 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 106.

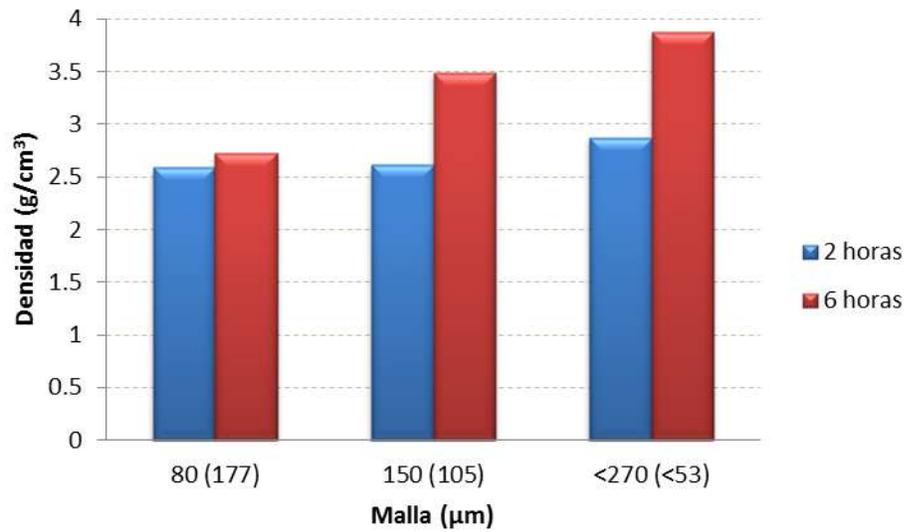


Figura 4. 14 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 107.

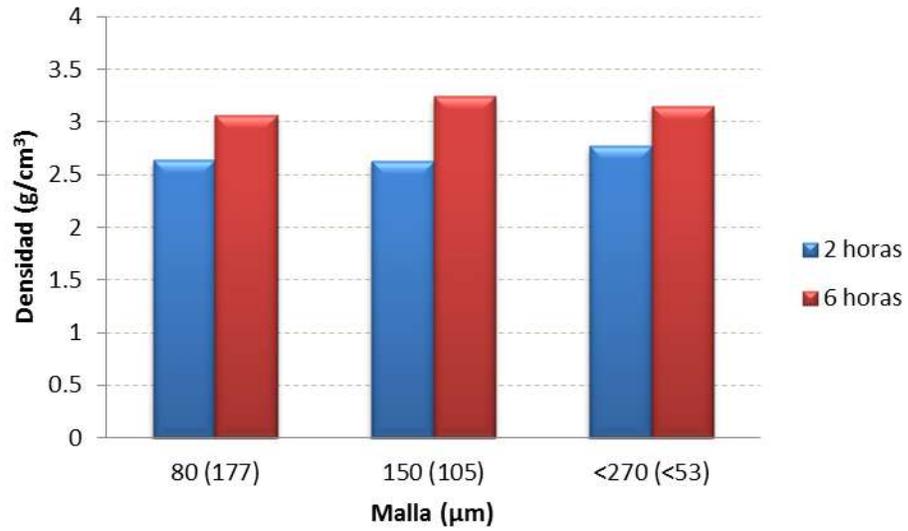


Figura 4. 15 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 108.

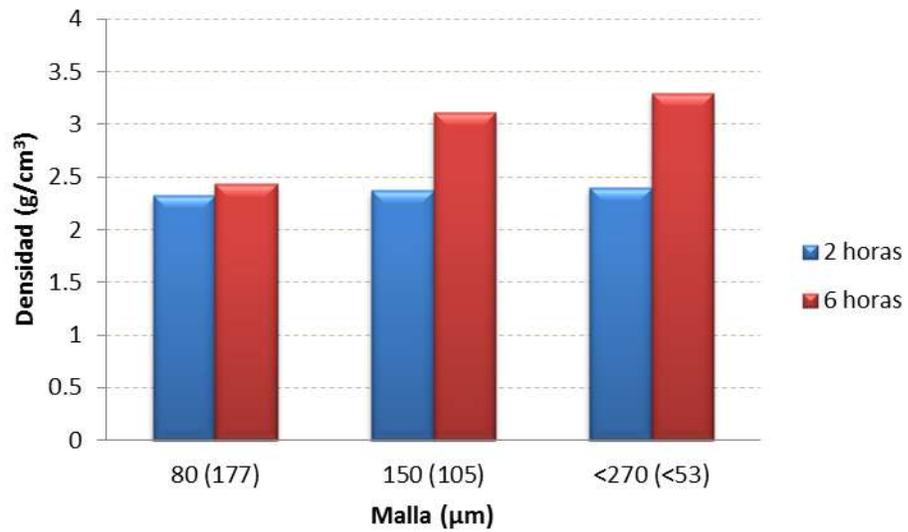


Figura 4. 16 Gráfica comparativa para los valores de densidad calculados a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 109.

Se observa que en el caso de 2 horas de molienda, la densidad no varía significativamente, sin embargo, al aumentar el tiempo de molienda a 6 horas, los valores calculados para la densidad aumentan en los rangos de partícula que están entre 100 y <270 μm .

4.3.4 Concentración de Au del tamaño de partícula grueso, medio y fino a 2 horas de molienda.

En la Figura 4.17 se presentan los datos obtenidos en el análisis químico cuantitativo con ayuda de absorción atómica para la cuantificación del contenido de Au en las muestras analizadas a dos horas de molienda. Las concentraciones fueron obtenidas para tamaño de grano grueso medio y fino.

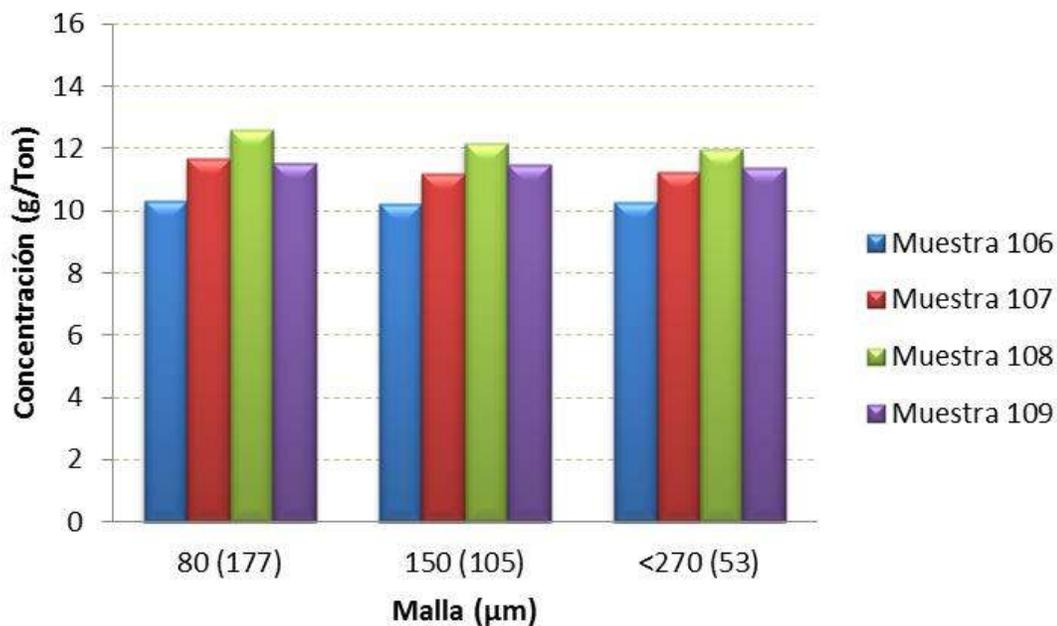


Figura 4. 17 Concentración de Au para las cuatro muestras analizadas a 2 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80} .

De la figura anterior se puede constatar que para los tamaños de partícula identificadas como gruesas (177 μm) se obtuvo la mayor concentración de Au y ésta fue disminuyendo conforme las partículas reducían su tamaño. Considerando que la separación gravimétrica toma ventaja de la respuesta de las partículas a la fuerza de gravedad, se concentran mediante este método las partículas con gravedad específica mayor y de tamaños mayores. Este comportamiento queda en evidencia en el procesamiento de partículas mediante la concentración con ayuda de un elutriador, donde las partículas más densas y más grandes se separan en el primer tubo aplicando el flujo de aire que se mencionó en el apartado anterior.

4.3.5 Concentración de Au del tamaño de partícula grueso, medio y fino a 6 horas de molienda.

Los resultados obtenidos para la concentración de Au para las cuatro muestras analizadas a 6 horas de molienda para los tamaños ya mencionados se presentan en la Figura 4.18.

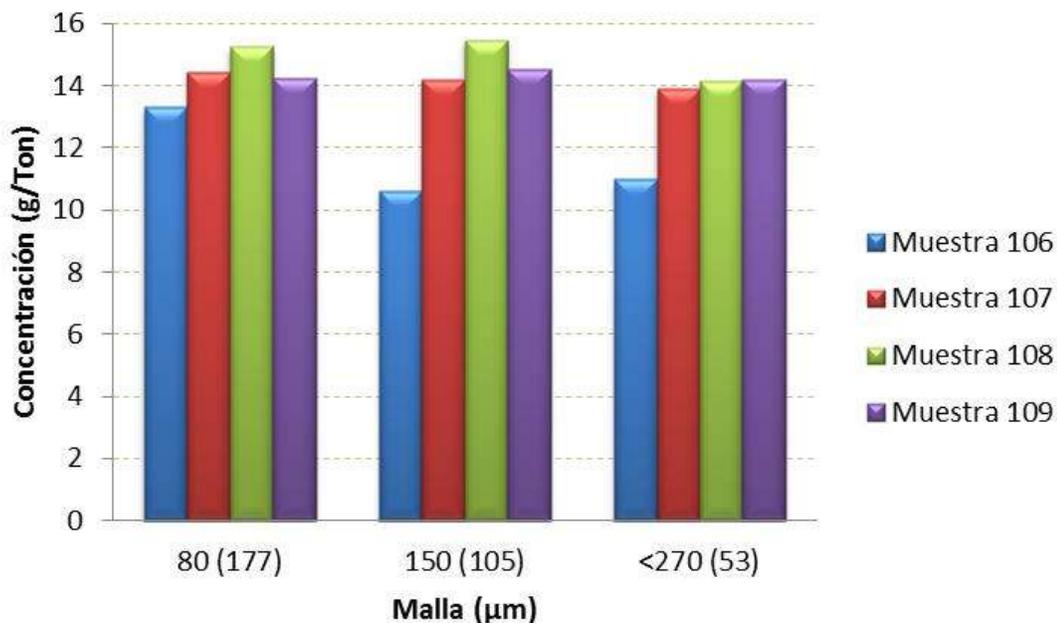


Figura 4. 18 Concentración de Au para las cuatro muestras analizadas a 6 horas de molienda. El número dentro del paréntesis corresponde al tamaño de partícula d_{80} .

En la figura anterior se puede observar que para las cuatro muestras analizadas, la mayor concentración de Au se encuentra entre las mallas 80 y 150, es decir, en el rango de partículas que va de 177 a 105 μm y en todas se observa una caída en la concentración para las partículas más finas. La explicación a este comportamiento es similar al mencionado en el caso de las partículas molidas a 2 horas; sin embargo, se puede observar que la concentración de Au a 6 horas de molienda aumento para las cuatro muestras analizadas con respecto a las concentraciones obtenidas a 2 horas de molienda y en el mineral de cabeza. Esto se debe a que a mayor tiempo de molienda, mayor cantidad de partículas de Au quedan liberadas y esto se pudo comprobar con el análisis químico cuantitativo.

En las Figuras 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 se grafican las concentraciones de Au que se obtuvieron a 2 y 6 horas de molienda con la finalidad de obtener una mejor comprensión de los datos obtenidos experimentalmente.

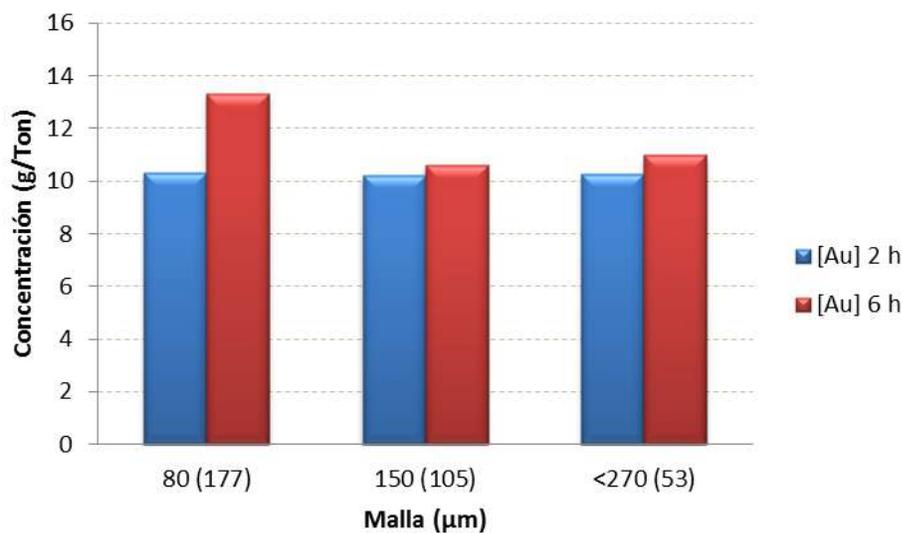


Figura 4. 19 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 106.

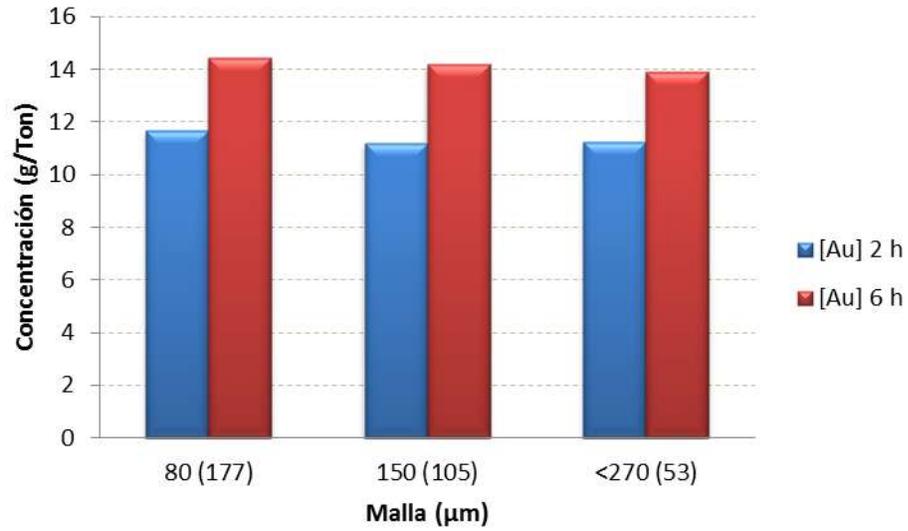


Figura 4. 20 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 107.

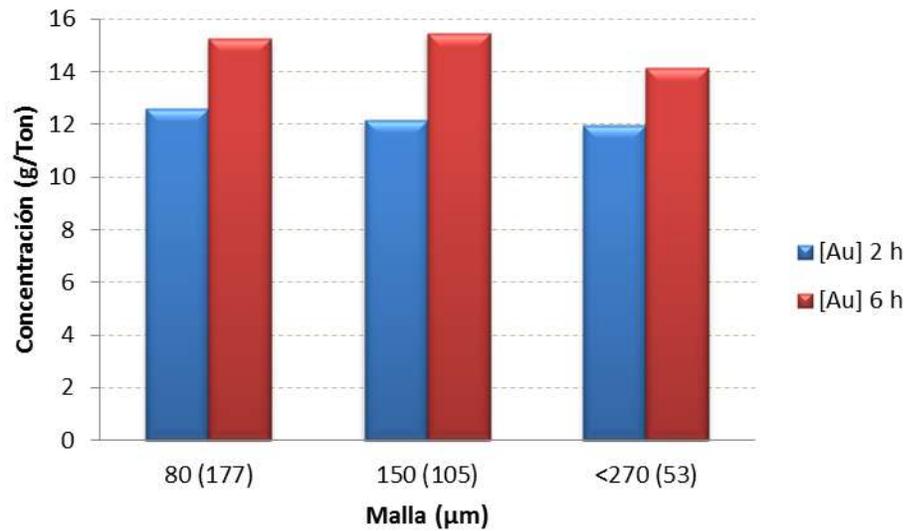


Figura 4. 21 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 108.

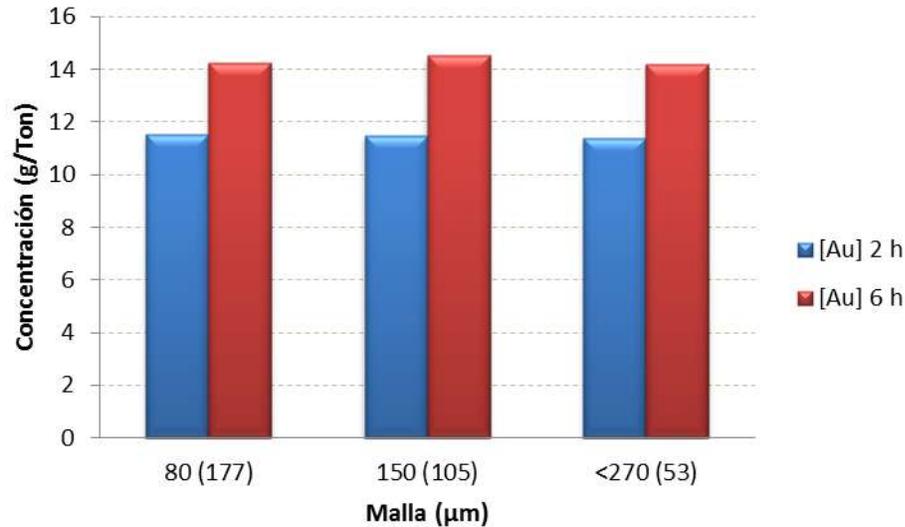


Figura 4. 22 Gráfica comparativa de las concentraciones de Au obtenidas a 2 y 6 horas de molienda para la muestra 109.

De la comparación anterior se aprecia que efectivamente a mayor tiempo de molienda la concentración de Au en el mineral de cabeza aumenta; es decir, se tiene mayor concentración a 6 horas de molienda que a 2 horas. No obstante, procesar un mineral durante 6 horas repercutiría en los costos de operación, por lo que es necesario reducir el tiempo de molienda hasta establecer el tamaño de partícula máximo que permita una recuperación aceptable de especies de oro, pero sin sacrificar el porcentaje del metal de valor liberado.

4.4 Propuesta del diseño de beneficio del mineral.

Para proponer el diseño del beneficio del mineral, se tomó en cuenta que la mayoría de los silicatos tienen una densidad entre 1.8 y 2.7 g/cm³ y que la densidad del Au es de 19.3 g/cm³, aplicando la fórmula para calcular el factor de concentración (FC) se obtuvo el siguiente resultado:

$$FC = \frac{D_h - D_f}{D_t - D_f} = \frac{19.3 - 1.2}{2.6 - 1.2} = \mathbf{12.92} \quad (4.1)$$

Recordando lo mencionado anteriormente, se sabe que si el factor de concentración es mayor a 2.5, ya sea positivo o negativo, la separación gravimétrica será factible. Por lo tanto, para este mineral analizado si es factible la separación o concentración de las partículas de valor por este medio. De los resultados obtenidos en la caracterización del mineral, se optó por llevar a cabo el beneficio utilizando métodos gravimétricos. A nivel laboratorio se empleó un elutriador con aire como medio fluido. A continuación se presentan los resultados obtenidos a nivel laboratorio utilizando el elutriador.

4.4.1 Beneficio del mineral por elutriación.

Como se mencionó en el apartado de la metodología, el equipo seleccionado para llevar a cabo las pruebas de beneficio del mineral a nivel laboratorio fue un elutriador con flujo de aire vertical, a dicho equipo se le inyectaron diferentes flujos de aire para encontrar el caudal adecuado al cual el equipo entregaba mejores resultados respecto a la concentración de las partículas de valor.

Los resultados obtenidos nos dicen que para éste mineral y a los tamaños de partícula establecidos que aseguran la liberación de las partículas de valor en este trabajo de investigación, a 60 L/min se observó la separación o concentración de las partículas alimentadas y durante un tiempo de 40 minutos.

Visualmente se pudo observar que con flujos menores al mencionado anteriormente, las partículas no respondían de manera favorable a la inyección de aire, es decir, que eran muy pocas las partículas arrastradas por el flujo hacia los tubos del elutriador. En cambio, si se aumentaba el flujo por encima del mencionado, las partículas de valor y las de desecho respondían de igual manera al flujo, por lo que gran parte de las partículas de valor eran arrastradas hasta los desechos o colas, debido a que su respuesta a la gravedad era similar para todas las partículas alimentadas en el equipo, lo que convierte al elutriador no un separador si no un transportador.

La prueba de concentración con ayuda del elutriador se realizó con la muestra 106, procesando el mineral durante una hora y alimentando una muestra con diferentes tamaños de partícula sin antes ser clasificada por tamiz.

A 1 hora de molienda se observó que los tamaños de partícula obtenidos eran adecuados para la separación gravimétrica, por lo que no era necesario invertir 6 horas de molienda ya que a 1 hora se obtenía un rango de partículas entre 100 y 56 μm .

Se alimentaron 150 g de la muestra mineral 106, se inyectó el mismo flujo de aire (60 L/min) y se mantuvo constante por 40 minutos. Una vez transcurrido el tiempo, la distribución en peso de la muestra 106 en los tubos del elutriador fue la siguiente:

Tubo 1 = 48.10 g

Tubo 2 = 46.76 g

Tubo 3 = 25.18 g

Tubo 4 = 18.31 g

Colas = 11.64 g

Se recolectó el mineral de cada tubo y se realizó análisis químico cuantitativo para conocer el contenido de Au correspondiente a cada uno. Se prepararon las muestras para digestión con agua regia y asistida por horno de microondas. Los resultados obtenidos de la cuantificación de Au se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4. 6 Concentración de Au para muestra 106 pulverizada 1 hora en molino de bolas y concentrada con ayuda de un elutriador.

Muestra 106	[Au] (g/ton)
Tubo 1	28.63
Tubo 2	11.99
Tubo 3	6.66
Tubo 4	6.66
Colas	6.66

En la tabla anterior se observa que la ley del mineral aumentó considerablemente en el tubo 1, la cual fue de 28.63 g/ton mientras que en el mineral de cabeza se obtuvo una concentración de Au de 8.66 g/ton para la muestra 106. La ley del mineral fue disminuyendo con respecto al aumento del diámetro de cada tubo, siendo los tubos 1 y 2 los de mayor interés, ya que estos dos tubos fueron los que retuvieron las partículas minerales con gravedad específica más alta y las partículas minerales más ligeras pasaron a formar parte de las colas o desechos.

A continuación, en la Figura 4.23 se representa esquemáticamente los valores correspondientes al porcentaje de recuperación del mineral, relacionando la muestra mineral alimentada, el concentrado y los desechos.



Figura 4. 23 Imagen representativa de distribución de los valores en las corrientes de alimentación, concentrado y desechos.

Del diagrama anterior se puede concluir que de los 150 gramos de mineral alimentados en el elutriador correspondientes a la muestra 106, 48.10 gramos de material suministrado pasaron a formar parte del concentrado, mientras que 101.89 g de muestra pasaron a las colas o desechos.

Para conocer el porcentaje de recuperación de oro que se obtuvo en esta prueba de beneficio del mineral aurífero con ayuda del elutriador, se aplicó la siguiente fórmula [28]:

$$R\% = \frac{c(f - t)}{f(c - t)} \times 100 \quad (4.2)$$

Donde:

f = Contenido de la especie de valor obtenida del ensayo de la alimentación.

c = Contenido de la especie de valor obtenida del ensayo del concentrado.

t = Contenido de la especie de valor obtenida del ensayo de los desechos.

Aplicando la ecuación 4.2 y sustituyendo los valores obtenidos en la cuantificación de Au para la alimentación, el concentrado y los desechos se obtiene lo siguiente:

$$R\% = \frac{c(f - t)}{f(c - t)} \times 100 = \frac{28.63(8.66 - 6.66)}{8.66(28.63 - 6.66)} \times 100 = 30.09\% \quad (4.3)$$

El valor de recuperación es relativamente bajo, sustentado por el contenido alto de oro en la corriente colas o desechos además de que es bien conocido el hecho de que ningún proceso de concentración es perfecto. Sin embargo, este resultado permite sugerir la implementación de un equipo industrial para la concentración gravimétrica del mineral ya que se comprobó a nivel laboratorio que es posible separar las partículas de valor por éste medio. Específicamente en este trabajo de investigación, en la concentración mediante el elutriador, primero se separaron las partículas más gruesas y aún las partículas finas, que se fueron a la corriente de colas contienen alto contenido de oro.

De igual forma que para el mineral de cabeza y el mineral clasificado en muestras de tamaño de partícula grueso, medio y fino se midió la densidad. Para el caso de las muestras recolectadas en cada tubo, solo fue posible medir la densidad del tubo 1 y las colas, esto debido a que las muestras se agotaron en el análisis químico cuantitativo. El valor para la densidad del tubo 1 fue de 5.96 g/cm^3 mientras que para las colas se obtuvo una densidad de 4.02 g/cm^3 . Lo cual indica que efectivamente el valor obtenido en la medición de la densidad del tubo 1 está relacionado con las partículas de oro concentradas en esta parte del elutriador, por lo cual la concentración de Au aumenta considerablemente.

4.5 Cálculo de costos de operación.

Con base en los resultados obtenidos en la operación de beneficio del mineral por elutriación a nivel laboratorio, se realizaron los cálculos para la estimación del punto de equilibrio. Se tomaron como referencia las bases de datos mostradas en el Anexo I para calcular los costos fijos y variables. En la Tabla 4.7 se presentan los costos semanales de los equipos necesarios en la extracción del mineral de cabeza. Los números en rojo son los que se pueden modificar.

Nota: el costo de la luminaria representa su valor a la compra.

Tabla 4. 7 Costo de operación de equipos por horas trabajadas semanalmente.

Horas trabajadas	No. equipos	Costos de operación de equipo:	
25	1	Bull D9	42,500.00
50	2	Camiones, 14 m ³ c/u	15,000.00
50	3	Excavadora 330	112,500.00
50	1	Payloader	18,750.00
0	1	Luminaria	500
0	0	Generador 500 KW	0
Suma de costos operación equipo =			189,250.00

En la Tabla 4.8 se resumen los salarios semanales de los operadores de la planta.

Tabla 4. 8 Pagos semanales de los empleados en la planta.

Pagos de salarios:		
1	Operadores Bull D9	5,000.00
2	Operadores camiones	5,000.00
3	Operadores excavadoras	15,000.00
1	Operador payloader	3,000.00
2	Mecánico	5,000.00
2	Ayudantes mantenimiento	3,000.00
1	Geólogo	3,500.00
5	Ayudantes generales	6,000.00
1	Velador	4,000.00
1	Ingeniero de minas	7,500.00
Suma de pagos de salario=		57,000.00

La Tabla 4.9 presenta la suma total del precio de diesel consumido semanalmente.

Tabla 4. 9 Pago semanal por consumo de diesel.

Horas trabajadas		Pago por consumo de diesel:	
25	1	Bull D9	19,500.00
50	3	Excavadora	20,407.00
0	0	Criba	0
5	1	Payloader	12,188.00
50	2	Camiones	7,313.00
12	1	Sistema de alumbrado	59.00
Suma de pagos de diesel =			59,465.00

Además de los salarios, gastos por diesel y renta de maquinaria, es necesario incluir los costos por mantenimiento de los equipos, normalmente en la industria minera el mantenimiento preventivo se lleva a cabo después de 200 horas efectivas de trabajo, este dato cambia dependiendo del uso de la maquinaria y del tiempo que lleve operando. De igual forma es necesario incluir el pago por regalías del terreno, ya que no será una inversión por compra sino por renta, en este caso las regalías se pagarán al municipio de Nocupétaro, siendo 3.5 dólares por tonelada de mineral extraído, este valor también puede ser modificado dependiendo del acuerdo al que se llegue con los dueños. La Tabla 4.10 resumen el total de pagos y costos semanales totales.

Tabla 4. 10 Pagos y costos semanales totales

Pago por mantenimiento preventivo =		40,625.00
325	Equipos (o por hora efectiva de trabajo)	
3.5	USD por tonelada de mineral extraído	121,406.25
Total por pagos y costos=		467,747.00

La Tabla 4.11 hace mención al precio por metro lineal de terreno barrenado, así como el precio por kilogramo de explosivo utilizado en caso de que el proceso de extracción lo demande. Se presenta el precio por litro de diesel en pesos mexicanos y la paridad precio dólar para llevar a cabo las conversiones necesarias.

Tabla 4. 11 Costo por barrenación, explosivos, diese y paridad peso-dólar.

TONELADAS POR SEMANA	1875
Metros lineales barrenados	0.0
Costos por metro lineal barrenado	600
Costo por barrenación, M.N. =	0
Kg explosivo por metro lineal barrenado	0.0
Costo total explosivo, M.N. =	0
Costo litro de diesel M.N.	19.50
Paridad pesos por un dólar	18.50

La Tabla 4.12 menciona que 1 metro lineal de terreno barrenado es igual a 9 m³ de mineral extraído y a su vez, también es equivalente a 27.9 toneladas del mismo mineral, tomando en cuenta que el factor de corrección por tepetate, es decir por material estéril es de 0.7, se tiene que en total 1 metro lineal de terreno barrenado es igual a 19.53 toneladas de mineral extraído.

Tabla 4. 12 Equivalencias de barrenación a toneladas.

1 metro lineal de barrenado =	9	m ³ de mineral
Densidad del mineral =	3.1	
1 metro lineal de barrenado =	27.9	Toneladas
Factor de corrección por tepetate =	0.7	
1 metro lineal de barrenado =	19.53	Toneladas

Para calcular la inversión total, el punto de equilibrio y las utilidades por la extracción del mineral aurífero, se realizó una base de costos (Tabla 4.13) incluyendo los gastos preoperativos, es decir, los gastos que implican los estudios previos al terreno que se desea explotar, así como la asesoría legal y técnica. Se incluyó el costo de las instalaciones físicas y costos de maquinaria y equipo. Los costos mencionados se amortizaron en base a la capacidad diaria de procesamiento de mineral de la planta, los turnos laborales y la ley del mineral.

Se tiene que para los gastos preoperativos es necesaria una inversión de \$1,450,000.00 pesos, los cuales serán amortizados por un período de 3 años. Para la instalación física será necesaria una inversión de \$500,000.00 pesos, dicha inversión será amortizada durante 10 años. Y por último, para cubrir los gastos de maquinaria y equipo serán necesarios \$2,550,000.00 pesos, que se amortizarán en un período máximo de 10 años. Dando como resultado una inversión total de \$4,500,000.00 pesos que cubrirán la inversión total de costos y gastos; por lo tanto, la amortización mensual será de \$86,111.11 pesos.

Tabla 4. 13 Cálculo de inversión total.

BASE DE COSTOS Y GASTOS			TOTAL INVERSIÓN (PESOS M.N.) =	8,761,584.53			
			TOTAL INVERSIÓN (USD) =	473,599.16	Depreciación/ Amortización	Depreciación/ Amortización	Depreciación / Amortización
Unidades	Bases generales			Total	Años	Anual	Mensual
	Capacidad instalada diaria	313	Toneladas totales de mineral extraído				
	Capacidad aprovechada (80%)	250	Toneladas totales de mineral extraído				
	Turnos laborales	1					
	Oro total cabeza, gramos por tonelada	5	%				
	Gastos preoperativos						
	Asesoría legal y técnica	100,000.00	\$		3	33,333.33	2,777.78
	Estudio de reservas probadas	1,000,000.00			3	333,333.33	27,777.78
	Estudio impacto ambiental y cambio uso de suelos	350,000.00	\$		3	116,666.67	9,722.22
				1,450,000.00			
	Instalaciones físicas						
	Terreno	0.00	50Hs		20	0.00	0.00
	Obra civil taller mantenimiento	100,000.00			10	10,000.00	833.33
	Obra civil oficina	100,000.00			10	10,000.00	833.33
	Caminos de servidumbre	300,000.00			10	30,000.00	2,500.00
				500,000.00			
	Maquinaria y equipo						
1	Camión pipa para transp. agua	550,000.00			5	110,000.00	9,166.67
1	Camión 5 ton	550,000.00			5	110,000.00	9,166.67
2	Camioneta 4x4	1,000,000.00			5	200,000.00	16,666.67

(Continuación Tabla 4.13)

1	Instalación eléctrica	50,000.00				10	5,000.00	416.67
0	Taller mantenimiento	0.00				10	0.00	0.00
1	Equipamiento de orquesta para lubricación en campo	250,000.00				5	50,000.00	4,166.67
1	Herramienta diversa para mantenimiento	100,000.00				5	20,000.00	1,666.67
1	Instalaciones varias y miscelaneos	50,000.00				10	5,000.00	416.67
					2,550,000.00			
					4,500,000.00		1,033,333.33	86,111.11

Para calcular el punto de equilibrio se tomó como base los costos fijos y costos variables. En los costos fijos se encuentran la depreciación y amortización calculada para la inversión inicial y los salarios para los empleados y operarios, dando un total de \$359,835.21 pesos mensuales necesarios para cubrir los gastos totales generados por las operaciones de extracción de mineral en la planta. Es decir, que diariamente se tendrá que cubrir al menos \$11,994.51 pesos para no presentar pérdidas en cuanto a recuperación de inversión y liquidación de salarios.

Para el cálculo de los costos variables se incluyó la energía eléctrica, el mantenimiento general de la planta, los consumibles y lubricantes y el pago por regalías a las personas dueñas del terreno a explotar. La suma de los costos anteriores arroja un total mensual de \$1,993,930.21 pesos, es decir que serán necesarios \$66,464.34 pesos diariamente para cubrir únicamente los costos variables. La suma de los costos fijos y los costos variables, da como resultado una necesidad mensual de \$2,353,765.42 pesos, de los cuales serán necesarios diariamente \$11,994.51 pesos.

Para calcular el punto de equilibrio, es decir, la toneladas de mineral extraído necesario para cubrir los costos mencionados anteriormente, se consideró que el precio de venta por tonelada de mineral aurífero se encuentra en 52 dólares al mes de febrero de 2018 y la paridad peso dólar en \$18.5 por lo tanto, el precio por tonelada en pesos es de \$962.00. Dividiendo los gastos totales diarios entre el precio por tonelada de mineral vendido, se tiene que el punto de equilibrio está en 81 toneladas de mineral extraído diariamente y a partir de ese número de toneladas extraídas, lo siguiente que se explote representarán ganancias para la empresa.

Para este proyecto, se tomó como base de cálculo la extracción de 250 toneladas de mineral diariamente y de 1875 toneladas semanales, incluyendo eficiencia operativa y de los equipos. Tomando como referencia que el precio por tonelada en pesos es de \$962.00 y que diariamente serán extraídas 250 toneladas, se tiene que el costo de recuperación será de \$162,041.15 pesos, de los cuales tendrán que descontarse \$78,458.85 pesos correspondientes a la amortización diaria, por lo tanto, las ganancias diarias netas serán de \$162,041.15 pesos. En la Tabla 4.14 se presenta el resumen de los valores mencionado anteriormente.

Tabla 4. 14 Cálculo del punto de equilibrio

	Extracción semanas toneladas mineral	1,875	Incluyendo eficiencia del equipo de extracción	
	Base de cálculo	250	Toneladas diarias de mineral extraído, incluyendo eficiencia operativa	
	Costos venta tonelada mineral aurífero, USD	52		
	Paridad pesos/dólar	18.5		
COSTOS				
	Costos fijos	Diarios	Unitarios diarios \$ M.N./ton extraída	\$ Mensual
	Depreciación y amortización	2,870.37	9.19	86,111.11
	Honorarios y salarios	9,124.14	29.20	273,724.10
	Total costos fijos	\$11,994.51	\$38.38	\$359,835.21
	Costos variables			
	Agua	0.00	-	0.00
	Pago por regalías	17,536.46	56.12	526,093.75
	Energía eléctrica	8.33	0.03	250.00
	Mantenimiento general	5,868.06	18.78	176,041.67
	Combustibles y lubricantes	10,000.00	32.00	300,000.00
	Costos por toneladas extraídas, M.N.	33,051.49	105,76	991,544.00
	Total costos variables	\$66,464.34	\$212.69	\$1,993,930.21
	Costo total	\$78,458.85	\$251.07	\$2,353,765.42

Punto de equilibrio = costo total	\$78,458.85	Gasto total diario, M.N.
	81	Toneladas de mineral extraído diariamente en el equilibrio.

A continuación, se presenta el análisis de costos calculado con los datos experimentales obtenidos en la concentración del mineral por elutriación a nivel laboratorio y el punto de equilibrio calculado anteriormente. Partiendo de una alimentación de 81,000 Kg (punto de equilibrio) con contenido de Au de 6.6 g/Ton, se obtuvo un concentrado de 8,100 Kg con 28 g/Ton de Au, es decir que en total se tienen 226.8 gramos de Au por cada 8100 Kg de concentrado y 72,900 Kg de colas con 5 g/Ton, cabe señalar que las colas pueden ser procesadas en una segunda etapa de beneficio para recuperar la mayor cantidad de oro posible y de esta manera aumentar las ganancias. Aplicando la ecuación 4.2 se calculó un porcentaje de recuperación del 29.51% a nivel laboratorio.

Tomando en cuenta que para un concentrado el porcentaje de metal a pagar es del 60%, que el precio por gramo de oro se encuentra en \$45.00 dólares y la paridad peso/dólar es de \$18.5, se tiene que:

El ingreso neto por masa de concentrado (8100 Kg) en dólares es de: **\$6,123.60**

Aplicando la paridad peso/dólar de \$18.5 se tiene un ingreso en pesos de: **\$113,286.6**

Los resultados anteriores son por cada 81 toneladas de mineral concentrado.

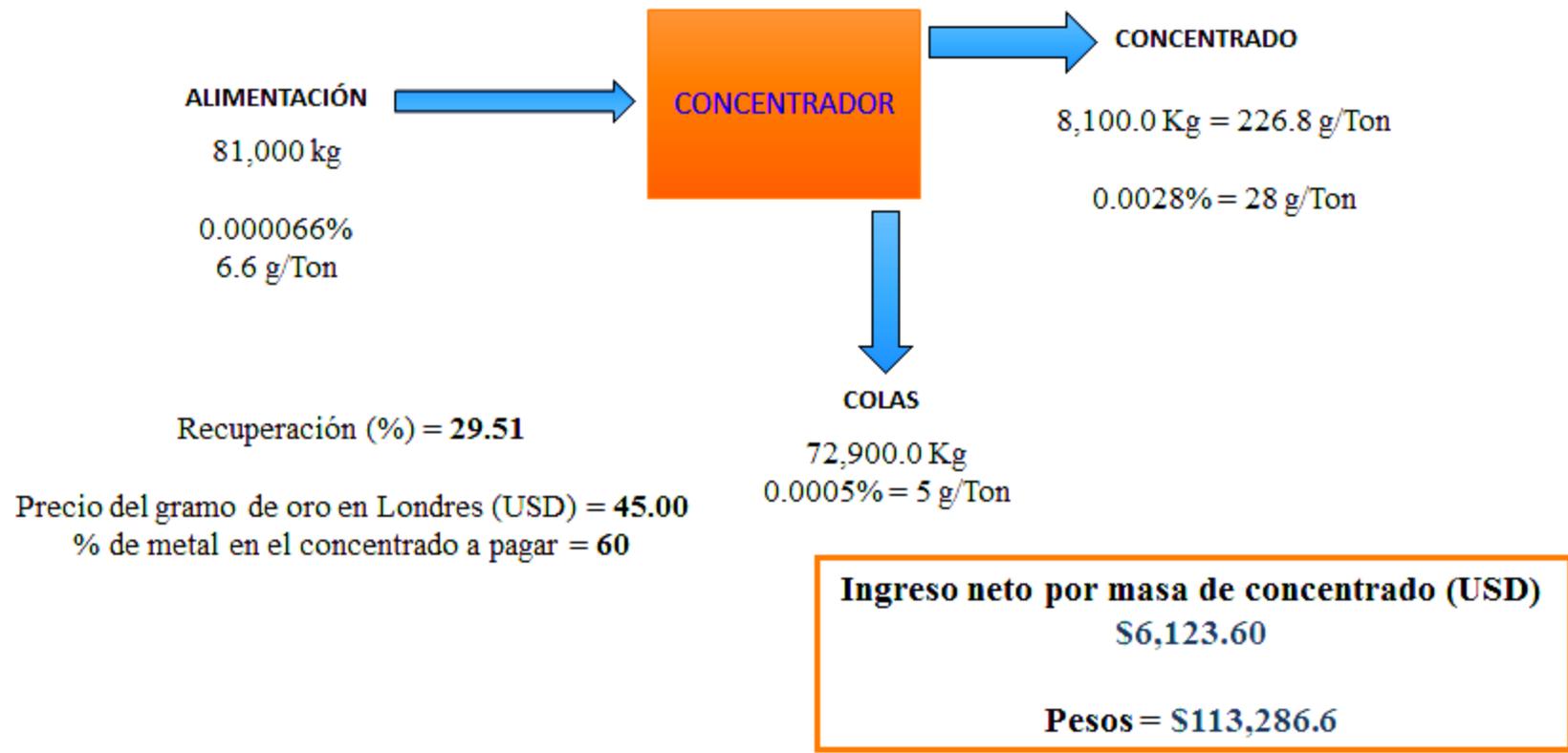


Figura 4. 24 Porcentaje de recuperación en el concentrador.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

De la caracterización química y física de un mineral aurífero de la región de Nocupétaro, Michoacán, así como del proceso de concentración del mismo a nivel laboratorio, se derivan las siguientes conclusiones:

1. El mineral de cabeza demuestran la presencia de oro en al menos 8.6 gramos por tonelada, lo que establece en principio la conveniencia de su extracción y procesamiento.
2. Se determinó por difracción de rayos X, la presencia de fases mineralógicas compuestas por silicio, oxígeno, aluminio, calcio, sodio y en algunos caso hierro en menor proporción. Las muestras varían muy poco en cuanto a la asociación mineralógica y composición química, siendo básicamente los mismos elementos químicos que las componen.
3. En general, se observa una relación directa entre la densidad del mineral de acuerdo a determinados rangos de tamaño de partículas y el contenido de oro. El aumento en la densidad corresponde a mayores contenidos de oro.
4. Calculando un factor de concentración de 12.92, se estableció la separación gravimétrica como opción viable para la concentración de Au, ya que se aprovecha la diferencia en el valor de propiedad relativa a la gravedad específica del oro (densidad) y de las demás fases mineralógicas.
5. El resultado del estudio de liberación indica que el tamaño de partícula adecuado para la concentración de las especies de oro es entre 150 y 100 μm , ya que a estos tamaños de partícula se obtuvo una concentración de oro que va de 13 a 15.5 g/Ton.
6. Los resultados de separación gravimétrica a nivel laboratorio mediante el uso del elutriador, muestran que la concentración del mineral aumentó conforme el diámetro del tubo de separación; esto es, del contenido de oro en el mineral de cabeza (8.66 g/ton) el tubo de mayor diámetro retuvo partículas con 28.63 g/ton de oro, el siguiente 11.99 g/ton,

mientras que para los dos tubos restantes de menor diámetro la concentración fue de 6.66 g/ton. El análisis en las colas indicó contenido de oro de 6.66 g/ton.

7. La recuperación en la separación gravimétrica en el laboratorio es de 30%, debido a las limitaciones propias del equipo.
8. Derivado de los cálculos del costo de operación, se estableció que el proceso de extracción y beneficio propuestos en este trabajo son factibles económicamente y el punto de equilibrio se encuentra en 81 toneladas procesadas por día.

Recomendaciones.

Realizar la separación gravimétrica en un dispositivo diferente al elutriador; por ejemplo, en un separador gravimétrico tipo iCON Falcon a nivel laboratorio, ya que en este equipo se puede tener un mejor control del efecto de la fuerza de gravedad sobre las partículas al variar la velocidad de rotación de la unidad de separación.

Establecer la velocidad de rotación en la unidad del separador para la recuperación óptima de especies auríferas y utilizando diferente tipo de mineral, rangos de tamaños de partículas y densidad de la pulpa a procesar.

Optimizar el resultado de elutriación modificando los flujos de aire para tener cierto control en el efecto de la fuerza de gravedad sobre las partículas.

Referencias bibliográficas.

- [1] QUEROL F. Problemática analítica del oro. Investigaciones Geológicas Cia Fresnillo S.A. de C.V. 2006.
- [2] MELGAREJO J C. PROENZA J A, GALÍ S, LLOVET X. Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. No. 62. 2010.
- [3] ERROL G K. AND SPOTTISWOOD D J. Análisis de los procesos de separación. En; Introducción al procesamiento de minerales. Limusa. 71–80. 1990.
- [4] WILLS B A. NAPIER-MUNN T. SEETON F A. Modeling and characterization. En; Minerals, Processing and technology. 8th ed. 449–461.2016.
- [5] BONEWITZ R L. Rocas y minerales: la guía visual definitiva. 1er ed. OMEGA. Barcelona. 2008.
- [6] NAVA J S. El oro y la plata. Tesoros minerales de México. 1er ed. México. Trillas. 2009.
- [7] LIVIA W P. Reciclado industrial de metales: una aproximación. 1.México. 4-5. 2006
- [8] CARREÓN D. Situación de la minería en México. En: Informe anual 2016. CAMIMEX. México. 12-15. 2016.
- [9] CARREÓN D. Estadísticas. En; Informe anual 2016. CAMIMEX. México. 125-159. 2016.
- [10] RAMOS Y. R., LEDESMA R. M. Características geológicas y mineralógicas e historia de extracción del Distrito de Guanajuato, México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 21. 268–284, 2004.
- [11] ANONIMO. Monografía geológico- minera del estado de Michoacán. 1er ed. Pachuca, Hgo. México, 1995.
- [12] SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO. Panorama minero del estado de Michoacán [en línea]. Disponible en:
<URL:<http://www.sgm.gob.mx/pdfs/MICHOACAN.pdf>> [Consultado en septiembre 2017].
- [13] OJEDA M. C., REYES J. L., ARAGÓN A. Caracterización mineralógica en la industria minera. En: Convención Minera del Bicentenario. México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 1–8. 2010.
- [14] BRUKER. D8 Series. En: Manual de usuario. Alemania. 23-30. 2010.
- [15] BETANCOURTH D. X-ray Diffraction Analysis on Rocks from Emerald Mining Region.

44. 257–260. 2010.
- [16] KONGOLO K. MWEMA M D. The Extractive Metallurgy of Gold. 1er ed. New York, USA. 79-82. 1991.
- [17] DULSKI T R. A manual for the chemical analysis of metals. 1era ed. American Society for Testing and Materials. Estados Unidos de América. 1996.
- [18] HAQUE K E. Microwave energy for mineral treatment processes — a brief review. International Journal of Minerals Processing. 1-24. Canada. 1998.
- [19] SKOOG D A. Espectrometría de absorción atómica y de fluorescencia atómica. En: Principios de análisis instrumental. 6th ed. C. Learning. 230–250. 2008.
- [20] SIERRA I. PÉREZ D. GÓMEZ S. MORANTE S. Ley de Lambert-Beer. Aplicaciones cuantitativas de la absorción molecular de la radiación UV-Vis. En: Análisis instrumental. 1er ed.. Netbiblo. 33-47. España 2010.
- [21] SORRIVAS V. MORALES A. YAÑEZ M J. Principios y práctica dela microscopía electrónica. 1er ed. E-book. México. 2014.
- [22] SKOOG D A. CROUCH S R. Determinación del tamaño de partícula. En: Principios de análisis instrumental, 6th ed., C. Learning. 950–962. 2008.
- [23] GARRITZ A. Tú y la Química. Primer ed. México. Pearson, 2001.
- [24] WILSON J R. Minerals- an introduction. En: Minerals and rock. Tercer ed. 14–20. 2010.
- [25] ERROL G K. SPOTTISWOOD D J. Susceptibilidad magnética. En: Introducción al procesamiento de minerales. Primer ed. México. Limusa. 1990.
- [26] ERROL G K. SPOTTISWOOD D J. Separación por concentración. En: Introducción al procesamiento de minerales. Limusa. 303–316. 1990.
- [27] ERROL G K. SPOTTISWOOD D J. Caracterización de las partículas. En: Introducción al procesamiento de minerales. Limusa. 45–68. 1990.
- [28] ERROL G K. SPOTTISWOOD D J. Operación de planta. En: Introducción al procesamiento de minerales. Limusa. 431–439. 1990.
- [29] ORTIZ A A. ANTONIO P. JARA N. SIXTO V. ROJAS A. FELIPE E. DELGADO L. JANET L. LAVADO Q. SANDOVAL M C. PUENTE L. CÉSAR S. GONZALES D. Factores que afectan la selección del proceso metalúrgico para beneficiar minerales complejos de oro. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG. 12. 49–55. 2009.
- [30] TESCHNER B. SMITH N M. BORRILLO-HUTTER T. QUAGHE Z. WONG T E. How

efficient are they really? A simple testing method of small-scale gold miners' gravity separation systems. *Minerals Engineering*. 105. 44–51. 2017.

- [31] AGORHOM E A. SKINNER W. ZANIN M. Upgrading of low-grade gold ore samples for improved particle characterisation using Micro-CT and SEM / EDX. *Advanced Powder Technoly*. 23. 498–508. 2012.
- [32] BURT R O. Gravity concentration technology. Elsevier. 1984.
- [33] SANDVICK R A. Gravity separation of bulk products in centrifugal fields. Primer ed. Alemania. 1977.
- [34] McALISTER S. Development of the Falcon Concentrator. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Alemania, 1998.
- [35] STEVEN M. Fine Gold Recovery using Falcon Concentrator. En: Northwest Mining Association. 95th Annual Convention. 1989.
- [36] MARION C. WILLIAMS H. LANGLOIS R. COELHO F. AWAIS M. ROWSON N A. WATERS K E. The potential for dense medium separation of mineral fines using a laboratory Falcon Concentrator. *Minerals Engineering*. 105. 7–9. 2017.
- [37] PARODI J P. Proyecto iCON. [en línea].

Disponibile en:

<URL :<http://proyectoicon.blogspot.mx/2009/05/concentrador-icon.html?m=1>.> [Consultado 20 de octubre 2017].

- [38] INSTITUTO TECNOLÓGICO GEOMINERO DE ESPAÑA. Minería Química. primer ed. España. Artes Gráficas. 1991.
- [39] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, D 854-00. Standard test methods for specific gravity of soils by water pycnometer. 2001.
- [40] WICANDER R. MONROE J S. Fundamentos de geología. Segunda ed. México. International Thomson Editores. 2000.

Anexo I

Costos para presupuesto

Los números en rojo se pueden modificar.

SALARIOS, PESOS MEXICANOS/SEMANA	
Operador retroexcavadora y bull	5,000.00
Operador triturador primario, secundario, impactador y criba	4,000.00
Mecanico de primera	5,000.00
Mecanico de segunda	2,500.00
Ayudante de mecanico	1,500.00
Operador de payloader	3,000.00
Operador de camion	2,500.00
Geologo	3,500.00
Topografo	3,500.00
Barrenador	10,500.00
Ingeniero A	8,500.00
Ingeniero B	8,000.00
Ingeniero C	8,000.00
Ingeniero D	7,500.00
Ingeniero E	7,500.00
Ingeniero F	7,000.00
Ingeniero G	7,000.00
Soldador	2,500.00
Ayudante general	1,200.00
Velador	4,000.00
Secretaria	4,000.00
Miscelaneo 5	5,000.00
Miscelaneo 6	5,000.00
Miscelaneo 7	5,000.00

COSTO POR RENTA DE EQUIPO, PESOS MEXICANOS POR MES POR 200 HORAS DE TRABAJO	
Triturador primario oruga Extec CL2 Plus	300,000.00
Triturador cono secundario Roadrunner 480	380,000.00
Trituradora Kue Ken 9x16	70,000.00
Criba CEC 5x12	144,000.00
Criba CEC 6x16	180,000.00
Criba Power Screen	204,000.00
Criba Extec	156,000.00
Excavadora CAT 320cl	115,000.00
Excavadora CAT 322bl	115,000.00
Excavadora CAT 345b	170,000.00
Excavadora I B 290lx	130,000.00
Excavadora MTSB EL300	70,000.00
Excavadora John 790elc	80,000.00
Excavadora CAT 330l	115,000.00
Excavadora CAT 375	230,000.00
Excavadora 300	100,000.00
Excavadora I B 3900	130,000.00
Excavadora J D 330lc	150,000.00
Excavadora J D 330lc	115,000.00
Payloader CAT 924g	75,000.00
Payloader CAT 966h	75,000.00
Payloader CAT 980g	115,000.00
Payloader Oruga J D	50,000.00
Bulldozer D 07H	150,000.00
Bulldozer D 09G	170,000.00
Bulldozer CAT D 10N	220,000.00
Bulldozer cat d 05	90,000.00
Tractocamion	70,000.00
Camion plataforma dina	70,000.00
Camion Pipa Frientliner	35,000.00
Low Boy	3000,000.00
Motoconformadora champion 710 ^a	70,000.00
Camion de volteo	30,000.00
Generador 545 kw	40,000.00
Sistema de iluminacion (costo mensual)	2,000.00
Trackdrill	120,000.000
Miscelaneo	0